

# ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO



## CARRERA DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA Y DEL MEDIO AMBIENTE

### “METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER COMPLETA”

Proyecto de Grado previo a la obtención del Título de:  
INGENIERO GEÓGRAFO Y DEL MEDIO AMBIENTE

ELABORADO POR:  
EDUARDO PATRICIO KIRBY POWNEY

SANGOLQUÍ, 13 DE FEBRERO DE 2007

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue realizado en su totalidad por el Sr. Eduardo Patricio Kirby Powney y que ha cumplido con los requerimientos establecidos para un Proyecto de Tesis como documento previo a la obtención del Título de Ingeniero Geógrafo y del Medio Ambiente.

Sangolquí, 13 de Febrero de 2007

---

Dr. Alfonso Tierra C.  
Director

---

Ing. Iván Medina R.  
Codirector

## DEDICATORIA

### *“El que persevera, alcanza”*

Con inmensa satisfacción dedico este proyecto:

- A Dios quien es la fuerza que me bendice cada día,
- A mi papi, quien cuando estuvo en vida, siempre se sacrifico por mi bienestar y el de mi familia, y ahora que está en el cielo me cuida en los andares del destino,
- A mis tres diamantes:
- Mi mami Gladys, aquella persona que me dio el ser y que siempre me ha apoyado en todas las etapas de mi vida,
- Mi esposa Stephy, quien es mi compañera y amiga, es la persona que con amor comparte mis tristezas y alegrías,
- Mi pequeña María Paz, mi pétalo sagrado, quien es fruto del amor con mi esposa y fuente de inspiración y alegría, razón por la cual, cada día tengo que ser mejor.

- A mi tío Danilo, ese ser tan especial que con su esfuerzo y bondad me dio la mano para alcanzar esta meta, el no sólo hizo eso, el ha sido como un padre para mi, mi amigo que ha compartido en estos siete años mis lágrimas, terquedades, ch...s, alegrías, objetivos, entre tantas cosas y que hoy sigue dándome su mano y cariño para seguir adelante sembrando y cosechando frutos para el cuidado de mi familia. Gracias tío por ser tan bueno y generoso, no sólo conmigo y mi familia, si no con todos. Que Dios le proteja y bendiga, y que siempre le dé mucho más de lo que da...

## AGRADECIMIENTOS

- A la Escuela Politécnica del Ejército, prestigiosa universidad, mi segundo hogar, en donde forjé mis estudios de ingeniería.
- Al Dr. Alfonso Tierra, director de la tesis, por su apertura profesional, persona incondicional en la que siempre pude contar cuando necesité ayuda para elaborar esta investigación.
- Al Ing. Iván Medina, codirector de la tesis, por todas sus enseñanzas y tiempo brindado para la elaboración de éste documento.
- Al Instituto Geográfico Militar, por el apoyo técnico y logístico brindado en el cumplimiento del proyecto.
- A mis hermanos, Miriam, Rocío, Dayal (+), Jhonny y Katiana, quiero expresarles también mis sentimientos de cariño y amor. Ustedes quienes han sido y son un apoyo en mi vida.
- A Gustavo y a mis tíos, quienes me abrieron las puertas de su casa y de su corazón.
- A mis primos que igualmente siempre me alentaron a que venga a estudiar en Quito y especialmente a mi prima “la flaca”, que se dio tiempo para ayudarme en la tesis.
- A mis suegros y cuñados, por el respaldo y ayuda entregados, colaborándome con los cuidados de María Paz mientras me preparaba para este gran día.
- Al Ing. César Leiva, jefe del Departamento de Geodesia, por toda la colaboración entregada como profesional y amigo.
- Al Ing. Alberto Andrade, forjador en mi carrera, y persona ejemplo de honestidad y trabajo.
- Al Ing. Alexander Robayo, amigo y profesor de la ESPE, quien siempre me ha extendido una mano y me ha brindado su apoyo en esta tesis.
- A la Ing. Susana Arciniegas, por su aporte de conocimientos, calidad moral y tiempo.
- A mis profesores de la ESPE, Pancho, Wilson, Oswaldo entre otros, por la labor realizada en mi formación integral en estos años de carrera universitaria.
- A la Sra. Adriana Chiriboga, secretaria casi decana de la Carrera, una mujer de temple y energía, por su apoyo y ayuda en todos estos años de batalla.
- A mis amigos: Flor, Santiago, Oswaldo, Rodrigo, Iván, Lénin, Pablo, los Pepes, Negro, los Diegos, Berraco, Molo, Víctor, Freddy, Rafa, Edisón, Beto y camaradas Conejos en general, por todas las aventuras, conocimientos, desveladas, etc. compartidas dentro de las aulas de la ESPE como afuera de ellas.

- Al Carlitos, ayudante de laboratorio, e Iván, amigos que me acompañaban en las horas de trabajo, cuando estuve en muletas haciendo la tesis.
- Al personal del Departamento de Geodesia, por su colaboración técnica y apoyo entregado.

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	ix
<b>LISTA DE TABLAS</b> .....	xi
<b>RESUMEN</b> .....	xii
<b>ABSTRACT</b> .....	xii

**PÁG.**

### CAPITULO I

#### INTRODUCCIÓN

1

### CAPITULO II

#### MARCO TEÓRICO

<b>2.1. SUPERFICIES DE REFERENCIA</b> .....	3
2.1.1. SISTEMA DE REFERENCIA.....	3
2.1.2. MARCO DE REFERENCIA.....	5
2.1.3. DÁTUM GEODÉSICO.....	6
2.1.4. SUPERFICIES DE LA TIERRA.....	7
2.1.4.1. Superficie Física de la Tierra.....	7
2.1.4.2. Esferoide.....	8
2.1.4.3. Geoide.....	10
<b>2.2. ELEMENTOS TEÓRICOS DE LA GRAVEDAD</b> .....	11
2.2.1. FUERZA DE ATRACCIÓN.....	11
2.2.2. LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL.....	11
2.2.3. LA FUERZA DE LA GRAVEDAD.....	12
2.2.4. GEOPOTENCIAL O POTENCIAL DE LA GRAVEDAD REAL.....	13

2.2.5. POTENCIAL DE LA GRAVEDAD NORMAL.....	15
<b>2.3. ANOMALÍAS DE LA GRAVEDAD.....</b>	<b>17</b>
2.3.1. REDUCCIÓN DE LA GRAVEDAD.....	18
2.3.2. ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE .....	19
2.3.3. ANOMALÍAS DE BOUGUER COMPLETA.....	20
2.3.3.1. Lámina de Bouguer (Corrección por la Capa Intermedia).....	20
2.3.3.2. Corrección del Terreno.....	23
<b>2.4. SISTEMAS DE ALTURAS.....</b>	<b>25</b>
2.4.1. ALTURAS DE TIPO GEOMÉTRICO.....	26
2.4.1.1. Alturas Niveladas.....	26
2.4.1.2. Alturas Elipsoidales.....	27
2.4.2. ALTURAS DE TIPO FÍSICO.....	28
2.4.2.1. Números Geopotenciales.....	28
2.4.2.2. Alturas Dinámicas.....	29
2.4.2.3. Alturas Ortométricas.....	30
2.4.2.4. Alturas Normales.....	31
<b>2.5. SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM).....</b>	<b>36</b>
<b>2.6. MODELO DIGITAL DE VARIACIÓN LATERAL DE DENSIDADES.....</b>	<b>39</b>

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA

<b>3.1. EVALUACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE.....</b>	<b>41</b>
3.1.1. EVALUACIÓN DE LA RED GPS DEL ECUADOR (RGPSE).....	41
3.1.2. EVALUACIÓN DE LA RED PSAD56E DEL ECUADOR (RPSAD56E).....	44
<b>3.2. EVALUACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM) DEL SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION).....</b>	<b>46</b>
<b>3.3. OBTENCIÓN DE LOS PUNTOS DE GRAVEDAD OBSERVADA (g) EN EL ÁREA DE ESTUDIO.....</b>	<b>49</b>
<b>3.4. METODOLOGÍA PARA CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE.....</b>	<b>49</b>
<b>3.5. OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE DENSIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DE VARIACIÓN.....</b>	<b>50</b>

<b>LATERAL DE DENSIDADES (MDVLD)</b> .....	
<b>3.6. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER SIMPLE</b> .....	53
<b>3.7. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN DEL TERRENO</b> .....	53
<b>3.8. METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER COMPLETA</b> .....	56

## CAPITULO IV

### CÁLCULOS Y RESULTADOS

<b>4.1. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA RED GPS DEL ECUADOR (RGPSE)</b> .....	58
4.1.1. RESULTADOS DE LA PRIMERA EVALUACIÓN DE LA RGPSE.....	58
4.1.2. RESULTADOS DE LA SEGUNDA EVALUACIÓN DEL RGPSE.....	58
4.1.3. RESULTADOS DE LA TERCERA EVALUACIÓN DE LA RGPSE.....	59
4.1.4. RESULTADOS DE LA CUARTA EVALUACIÓN DE LA RGPSE.....	60
<b>4.2. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA RED PSAD56 DEL ECUADOR (RPSAD56E)</b> .....	61
4.2.1. RESULTADOS DE PRIMERA ETAPA DE EVALUACIÓN DE LA RED PSAD56 DEL ECUADOR (RPSAD56E).....	61
4.2.2. RESULTADOS DEL SEGUNDA ETAPA DE EVALUACIÓN DE LA RED PSAD56 DEL ECUADOR (RPSAD56E).....	61
<b>4.3. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM) DEL SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION)</b> .....	62
4.3.1. RESULTADO DEL NÚMERO DE HOLES (GAPS) EN EL SRTM.....	62
4.3.2. RESULTADOS DE LA SEGUNDA EVALUACIÓN DEL DEM DEL SRTM.....	63
4.3.3. RESULTADOS DE LA TERCERA EVALUACIÓN DEL DEM DEL SRTM.....	64
4.3.4. CÁLCULO DEL ERROR EN LA EVALUACIÓN DEL DEM DEL SRTM....	64
<b>4.4. RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LOS PUNTOS DE GRAVEDAD OBSERVADA DE LA BASE DE DATOS DENSIFICACIÓN GRAVIMÉTRICA DEL ECUADOR</b> .....	65
<b>4.5. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LAS ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE</b> .....	66
<b>4.6. RESULTADOS DE LOS 158 PUNTOS CON DENSIDAD MEDIA OBTENIDOS A PARTIR DEL MODELO DIGITAL DE VARIACIÓN LATERAL DE DENSIDADES</b> .....	70
<b>4.7. CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER SIMPLE</b> .....	73

<b>4.8. RESULTADOS DE LA CORRECCIÓN DEL TERRENO OBTENIDAS UTILIZANDO EL PROGRAMA TC (TOPOGRAPHY CORRECTION).....</b>	<b>79</b>
<b>4.9. RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER COMPLETO.....</b>	<b>83</b>

## **CAPITULO V**

### **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

<b>5.1. CONCLUSIONES.....</b>	<b>90</b>
<b>5.2. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>91</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>93</b>

## **ANEXOS**

<b>ANEXO A.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>97</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>100</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>109</b>
<b>ANEXO F.....</b>	<b>110</b>
<b>ANEXO G.....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXO H.....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>113</b>
<b>ANEXO J.....</b>	<b>117</b>



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA	PÁG.
2.1: Sistema Terrestre Convencional de Referencia.....	4
2.2: Superficie Física de la Tierra.....	7
2.3: Elipse y sus elementos.....	8
2.4: Elipsoides de referencia local.....	9
2.5: Elipsoides de referencia global.....	10
2.6: Superficies de la Tierra más utilizadas en Geodesia.....	11
2.7: Aceleración de la Gravedad.....	13
2.8: Anomalía de la Gravedad.....	17
2.9: Lámina de Bouguer.....	21
2.10: Capas Geológicas.....	23
2.11: Corrección del Terreno.....	24
2.12: Alturas Niveladas.....	26
2.13: Alturas Elipsoidales.....	27
2.14: Nivelación clásica y superficies equipotenciales diferentes.....	28
2.15: Alturas Ortométricas.....	30
2.16: Teluroide.....	32
2.17: Alturas Normales.....	32
2.18: Anomalía de Altura o Altura Anómala.....	33
2.19: Tipos de alturas y sus superficies de referencia.....	34
2.20: Señales del Radar siendo transmitidas y recibidas en la misión del SRTM.....	36
3.1: Modelo Digital de Elevaciones del SRTM en el Ecuador.....	47

3.2: Isla Santay (puntos Hn en amarillo de RPSAD56E dentro de los gaps de la Isla Santay).....	48
3.3: Puntos con altura Hn (color amarillo) que coinciden especialmente con los gaps del SRTM.....	48
3.4: Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD) en el Ecuador Continental.....	51
3.5: Mapa Geológico del Ecuador.....	52
3.6: Perfil Geológico Lateral.....	52
3.7: Radios de las Áreas de influencia en la Corrección del Terreno.....	56
4.1: Puntos sin error RPSAD56E de altura < - 50 m y > 50m.....	62
4.2: Mapa de Anomalías de Aire Libre.....	69
4.3: Mapa de Anomalías de Bouguer Simple.....	79
4.4: Mapa de Anomalías de Bouguer Completa.....	89

## LISTA DE TABLAS

TABLA	PÁG.
2.1 Parámetros geométricos de los elipsoides W65 84 y GRS 80.....	6
2.2 Parámetros geométricos de los elipsoides de referencia W65 84 Y PSAD56.....	10
2.3 Características principales de los diferentes tipos de alturas físicas.....	35
2.4 Algunos detalles técnicos del DEM del SRTM.....	37
3.1 Muestra de la BD1 Elenco de Coordenadas de los Puntos de la Red GPS del Ecuador.....	42
3.2 Muestra del Contenido de la BD2 Monografías de la Red GPS SIRGAS de Control Horizontal.....	42
3.3 Resultados de la Revisión de las coordenadas cartesianas Z del Reporte 73 vs. la BD2 Elenco de Coordenadas de los puntos Red GPS del Ecuador.....	44
3.4 Muestra del contenido de la BD2 Monografías de la Red PSAD56 de Control Horizontal del Ecuador.....	45
4.1 Resultados de la Primera Evaluación de la Red GPS del Ecuador.....	58
4.2 Resultados de la Segunda Evaluación de la Red GPS del Ecuador.....	59
4.3 38 Puntos de la RGPSE Con Hn utilizados en la evaluación del SRTM.....	59
4.4 Resultados de la evaluación de la Red PSAD56 del Ecuador en la primera etapa	61
4.5 Resultados de la segunda etapa de evaluación de la RPSAD56E.....	61
4.6 Número de Holes (Gaps) en el DEM del SRTM.....	62
4.7 Resultados de la segunda evaluación del SRTM.....	63
4.8 Tercera evaluación del SRTM.....	64
4.9 Resultados de los puntos de gravedad utilizados para la obtención de las Anomalías de Bouguer.....	65
4.10 Anomalías de Aire Libre.....	66
4.11 158 puntos con valor de densidad media para el área de estudio.....	70

4.12 Anomalías de Bouguer Simple.....	74
4.13 Corrección del Terreno.....	79
4.14 Anomalías de Bouguer Completa.....	84

## RESUMEN

En el caso del cálculo de Anomalías de Bouguer, generalmente éstas han sido calculadas y determinadas en el Ecuador de forma incompleta, usando una densidad constante para toda el área de análisis, sabiendo que en el Ecuador existe gran variación de densidad debido a su estructura geológica. Dentro de este contexto se presenta y describe una metodología para el cálculo de las Anomalías de Bouguer Completa. Para ello se usará una variación de densidades media a partir de un Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD) para el cálculo del Plato de Bouguer y para el cálculo de la Corrección del Terreno se usará una densidad media del área de estudio y del DEM (Modelo Digital de Elevaciones) del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). La metodología y resultados alcanzados descritos en este documento, presentan una alternativa de solución para continuar y alcanzar con los requerimientos inmediatos en la determinación de un dátum vertical único para Sudamérica y posteriormente en la determinación del Modelo Geoidal Regional o Mundial.

## ABSTRACT

In the case of the Bouguer Anomalies calculations, these have been calculated and determined incompletely in Ecuador, using a constant density for the whole area of analysis, having in mind that in Ecuador exists great variation of density due to its geological structure. A complete methodology to calculate the Bouguer Anomalies is presented and described in this contest. It will be used a variety of media densities since a Digital Model of Lateral Variation of Densities (MDVLD) for the calculations of the Bouguer plate and for the calculations for the terrain correction it will be used a media

density of the area studied and from the DEM (Elevations Digital Model) of the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). The methodology and results described in this document present an alternative solution to continue and to reach with the immediate requirements in the determination of a unique vertical datum for South America and afterwards with the determination of the Regional or World Geoid Model.

## CAPÍTULO I

---

### INTRODUCCIÓN

A nivel mundial muchas investigaciones se están realizando en busca de un Modelo Geoidal único. En el caso de la Comunidad Sudamericana de Naciones, existe la Subcomisión de Gravedad y Geoide para América del Sur para desarrollar el Modelo Regional Geoidal. Es así, que cada país debe realizar esfuerzos y estudios para conseguir ese objetivo; para el efecto fueron creados varios grupos de trabajo dentro del Proyecto SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) (GT-I, GT-II, GT-III), como es el caso del Grupo de Trabajo III, que se encarga del estudio en la determinación de un Datum Vertical único para Sudamérica; de ahí que cada país deba aportar con los estudios e investigaciones para cumplir con los objetivos de dicho grupo.

En los países de América del Sur, a través del proyecto SIRGAS, viene adelantándose la definición y materialización de un nuevo sistema vertical de referencia, que sea compatible con las técnicas espaciales GPS (Global Positioning System) y que elimine las discrepancias presentes entre los dátums verticales definidos a partir del nivel medio del mar. El resultado esperado es un sistema vertical unificado para todos los países de la región, que sirva de complemento al sistema geométrico SIRGAS ya establecido. (Sánchez L., 2006)

Dentro de los requisitos inmediatos para avanzar en la realización del nuevo sistema vertical de referencia para América del Sur, según Sánchez L. (2006), se necesita de la interpolación de los valores de gravedad para el cálculo de los números Geopotenciales, ya que, la densidad de los puntos gravimétricos utilizados para el cálculo de los números geopotenciales (C), es menor que la de los nivelados en una proporción aproximada de 1:3 (Sánchez L., 2006).

De acuerdo con esto, aquellos puntos de nivelación cuyo valor de gravedad no ha sido observado directamente, pueden ser interpolados a partir de sus coordenadas geográficas, su altura aproximada y las anomalías de Bouguer. (Sánchez L., 2004; Heiskanen W. & Moritz H., 1985), ya que este tipo de anomalías (Bouguer) están menos correlacionadas con el valor de la altura, como es el caso de las anomalías de Aire Libre (Sansó F., et al., 1994; Heiskanen W. & Moritz H., 1985).

El Instituto Geográfico Militar (IGM) es el representante por el Ecuador para hacer los trabajos y análisis respectivos en relación con este tema, para lo cual, el IGM está colaborando con la Escuela Politécnica del Ejército (ESPE) en la realización del Modelo Geoidal del Ecuador Continental. Actualmente se encuentra en la etapa de densificación gravimétrica y posteriormente se tendrá que calcular el Modelo Geoidal, por tanto, para ello se debe calcular las Anomalías Gravimétricas.

En el caso del cálculo de Anomalías de Bouguer, generalmente éstas han sido calculadas y determinadas de forma incompleta, usando una densidad constante para toda el área, sabiendo que en el Ecuador existe gran variación de densidad debido a su estructura geológica.

En este proyecto de grado se pretende presentar una metodología para el cálculo de las Anomalías de Bouguer Completa. Para ello se usará una variación de densidades media a partir de un Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD) para el cálculo del Plato de Bouguer y para el cálculo de la Corrección del Terreno se usará una densidad media del área de estudio y del DEM (Modelo Digital de Elevaciones) del SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

Los objetivos planteados en este estudio son:

❖ **Objetivo General:**

Calcular las Anomalías de Bouguer Completa, mediante el uso del Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD) y del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) obtenidas del satélite Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).

❖ **Objetivos Específicos:**

- Calcular la corrección del Terreno con una densidad media del área de estudio.
- Calcular la corrección debido al Plato de Bouguer usando la densidad media del Modelo Digital de densidades de variación lateral.
- Calcular las Anomalías de Aire Libre.

❖ **Metas:**

- Evaluar el Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) usando las alturas Nivel Medio del Mar (NMM).
- Calcular la Corrección del Terreno con una densidad media del área de estudio  $1^\circ$  de longitud y  $1^\circ$  de latitud del Territorio Ecuatoriano.
- Calcular la Corrección debido al Plato de Bouguer usando la densidad media de una columna geológica obtenida del Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD).
- Calcular la Gravedad Normal y la Corrección de Aire Libre para la determinación de las Anomalías de Aire Libre.
- Elaborar un mapa de las Anomalías de Bouguer.

---

## CAPÍTULO II

---

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. SUPERFICIES DE REFERENCIA

El conocimiento de la verdadera forma de la tierra y de los Sistemas de Referencias, ha sido una necesidad, problema y desvelo de algunos científicos e investigadores desde 5.000 años a.C. hasta nuestros días.

En general, las mediciones geodésicas requieren del manejo de coordenadas espaciales, geodésicas y planas, las mismas que son relativas a un sistema de referencia, materializadas por un marco de referencia y conectadas por uno o más dátums geodésicos, ya que en algunos casos presentan dificultades y generan confusión entender estos términos; por tal motivo es necesario definir cada uno de ellos.

Existen varias definiciones que conceptualizan lo que es un *sistema de referencia*, por ejemplo: En cinemática, un sistema de referencia es un conjunto de convenciones para poder medir la posición de un objeto físico en el tiempo y el espacio. En mecánica clásica frecuentemente se usa el término para referirse a un sistema de coordenadas ortogonales para el espacio euclídeo (dados dos sistemas de coordenadas de ese tipo siempre existe un giro y una traslación que relacionan las medidas de esos dos sistemas de coordenadas).

Así cómo existen varias definiciones de sistema de referencia, también existen varias definiciones de todos los temas a tratar en este capítulo, en este caso es necesario centrarse en los conceptos de interés para llegar a comprender las Anomalías de Bouguer.

##### 2.1.1.SISTEMAS DE REFERENCIA

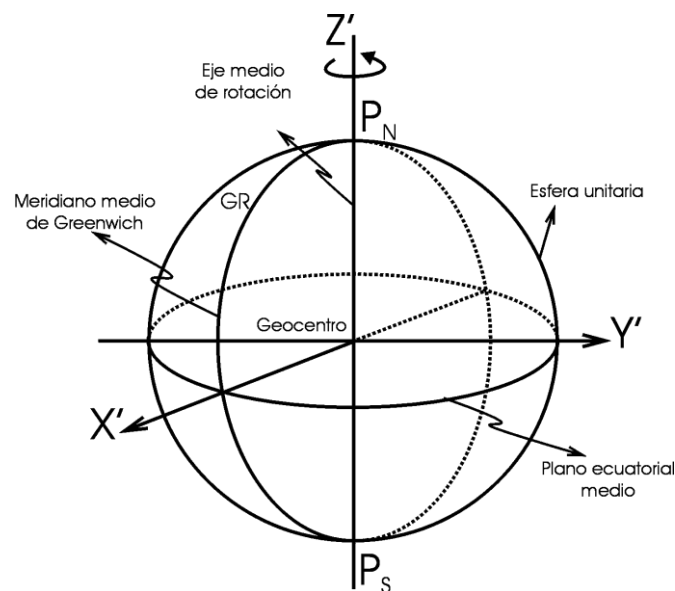
Un *sistema de referencia*, es el conjunto de convenciones y conceptos teóricos adecuadamente modelados que permiten definir, en cualquier momento, la orientación y ubicación de tres ejes coordenados (X, Y, Z). Dado que un sistema de referencia es un modelo (una concepción, una idea) éste es accesado (realizado, materializado) mediante puntos reales cuyas coordenadas son determinadas sobre el sistema de referencia dado, dicho conjunto de puntos se denomina *marco de referencia (Reference Frame)*. (Sánchez L., 2004).

Los sistemas de referencia se clasifican en tres tipos: los *sistemas de referencia convencionales*, que son una definición arbitraria de los ejes coordenados, vectores principales o direcciones de referencia; los *sistemas de referencia inercial*, consideran a la gravedad y a la rotación terrestre y se dice que es inercial cuando no está acelerado con respecto al conjunto universo; y, los *sistemas de referencia cuasi-inercial*, que consideran una aceleración lineal en la velocidad de rotación de la tierra. (Drewes H., 2002; Encarta, 2005).

Cómo ejemplos de sistema de referencia se puede citar el WGS 84, ITRS, entre otros.

- **World Geodetic System 1984 (WGS84):** es uno de los sistemas de referencia global, cuyo origen es el geocentro (Centro de masas terrestres incluyendo las masas de los océanos y de la atmósfera), que originalmente fue establecido para determinar las coordenadas de las órbitas de los satélites Doppler. Fue adoptado también para las órbitas de los satélites NAVSTAR-GPS (Navigation System Time And Ranging Global Position System- Global Positioning System).
- **IERS Terrestrial Reference System (ITRS):** es un sistema de referencia del Servicio Internacional de Rotación Terrestre (IERS: International Earth Rotation Service) establecido para la determinación de la rotación de la Tierra en el sistema de referencia celeste (ICRS) por combinación de diferentes técnicas espaciales. El ITRS se define con origen en el centro de masas terrestre (*geocentro*) (incluyendo las masas de los océanos y de la atmósfera), con una precisión de  $\pm 5$  cm. (Sánchez L.,2004; Leiva C., 2005). Su polo coincide con el polo definido por el CIO (Convventional International Origin) , el eje X' es orientado hacia el meridiano de Greenwich, el eje Z' está orientado hacia el polo del CIO y el eje Y' forma un sistema ortogonal derecho; *ver figura 2.1*

Figura 2.1 Sistema Terrestre Convencional de Referencia



Fuente: Drewes H., 2002

### 2.1.2. MARCO DE REFERENCIA.



Un *marco de referencia* es la realización práctica o materialización de los conceptos teóricos introducidos en el sistema de referencia. Tal materialización se da a través de la determinación de puntos fiduciales (de alta precisión).

Un sistema de referencia no tiene aplicación práctica si no es mediante la utilización de un marco de referencia el cual, a su vez, proporciona los puntos de control que permiten mantener actualizado el sistema de referencia. En el proceso de retroalimentación existente entre estos dos aspectos, el sistema y el marco de referencia conforman la pareja idéntica necesaria para la definición de una plataforma de georeferenciación (Sánchez L., 2004)

Cómo ejemplos de *marco de referencia* se puede citar, ITRF, SIRGAS, Red Nacional GPS del Ecuador, entre otros.

- **IERS Terrestrial Reference Frame (ITRF):** la aplicación práctica del ITRS se da a través de la definición de su marco de referencia ITRF, el cual está dado por un número de estaciones en la superficie terrestre (aproximadamente 300) con coordenadas cartesianas geocéntricas (X, Y, Z) dadas para una época fija y sus variaciones en el tiempo (velocidades de un conjunto de estaciones permanentes observadas continuamente). El marco de referencia terrestre ITRF diverge del sistema de referencia satelital, lo que obliga que las coordenadas ITRF sean trasladadas en el tiempo de acuerdo con su variación por la presencia de la dinámica terrestre.

La sigla ITRF es acompañada por el año en que son válidas tales posiciones, es decir en ITRFyy los números yy especifican el último año en que esa información fue utilizada en la formación o definición del marco de referencia. Por ejemplo, el ITRF97 se designa como el marco de coordenadas y velocidades calculadas en 1997 utilizando toda la información disponible en el IERS durante 1996. La última realización del marco internacional de referencia es el ITRF2005.

La principal utilidad del ITRF es que, a partir de su definición se calculan las efemérides precisas de los satélites GPS por el Servicio GPS Internacional (IGS). (Sánchez L., 2004; Drewes H., 2002; Leiva C., 2005)

- **Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas (SIRGAS):** con el propósito de hacer una extensión del ITRF mundial en América del Sur, se decidió establecer una red de estaciones GPS de alta precisión con la densidad suficiente de puntos para el cubrimiento homogéneo de la zona y además, garantizar la participación de cada uno de los países de esta parte del continente; inicialmente establecido para América del Sur por 58 estaciones en 1995 (época 1995.4) y extendido al Caribe, Norte y Centroamérica en el año 2000 con 184 estaciones en las Américas (estaciones en mareógrafos y cercanas a los límites internacionales para atender requerimientos del GT-III (GT= grupo de trabajo)); formalmente adoptado en febrero de 2001.

En el Proyecto SIRGAS, las labores inicialmente desempeñadas se clasificaron en dos grupos de trabajo:

- Grupo I: Sistema de Referencia (GT-I), cuyo objetivo era la definición del sistema geodésico de referencia para América del Sur (coincidente con el definido por el ITRS)

y el establecimiento y mantenimiento del marco de referencia (red de estaciones GPS de alta precisión).

- El Grupo II: Dátum Geocéntrico (GT-II), mediante la extensión de la red GPS SIRGAS a través de la integración de las redes geodésicas nacionales de cada uno de los países suramericanos, se encargó de establecer un dátum geocéntrico.

Para llevar a cabo estas labores, se acordó utilizar como dátum geocéntrico un sistema de ejes coordenados basado en el sistema de referencia SIRGAS y con los parámetros del elipsoide GRS80 (Geodetic Reference System, 1980). Ver tabla 2.1

<b>Tabla 2.1 Parámetros geométricos de los elipsoides WGS 84 y GRS 80</b>		
Elipsoide de Referencia	WGS 84 (World Geodetic System of 1984)	GRS 80 (Geodetic Reference System of 1980)
Semieje mayor	6378137	6378137
Achatamiento	1/298.257223563	1/298.257222101

- De otra parte, con el propósito de definir y establecer una plataforma vertical de referencia común para América del Sur, el proyecto SIRGAS ha establecido el tercer grupo de trabajo denominado Dátum Vertical (GT-III) que, al igual que los dos grupos de trabajo definidos anteriormente, cuenta con la colaboración de consultores científicos y la concurrencia de representantes de los Institutos Geográficos de los países miembros.

Las resoluciones adoptadas por el GT-III, son entre otras, la adopción de un sistema de referencia vertical único para toda América del Sur con dos tipos de altitudes: Alturas elipsoidales para definir el marco de referencia y otro tipo (ortométricas, dinámicas o normales), obtenidas a partir de los números geopotenciales, a fin de satisfacer las necesidades prácticas de los usuarios y la materialización del sistema de referencia vertical mediante el establecimiento de un conjunto de estaciones niveladas geométricamente, con valores de gravedad conocidos y coordenadas definidas en el Sistema SIRGAS, incluyendo en la campaña SIRGAS 2000, los mareógrafos que definen los diferentes dátum verticales clásicos existentes, las estaciones próximas a los límites internacionales, y las estaciones SIRGAS 1995. (Sánchez L., 2004).

### 2.1.3.DÁTUM GEODÉSICO

El *Dátum Geodésico* se define como un conjunto de parámetros que determinan la forma y dimensiones del elipsoide de referencia que conectan las mediciones con el sistema de referencia. (Drewes H., 2002; <http://www.icv.gva.es/index.htm>).

La orientación y ubicación del elipsoide asociado a un sistema coordenado (X, Y, Z) se conoce como *Dátum Geodésico*; si el sistema (X, Y, Z) es geocéntrico se tendrá un *Dátum Geodésico Geocéntrico (Global o Moderno)*, como el GRS80 o WGS84; y, si el sistema (X, Y, Z) es local se tendrá un *Dátum Geodésico Local (Horizontal o Clásico)*, como PSAD56. (Sánchez L., 2004).

Cómo ejemplos de *Dátum Geodésico* podemos citar:

- **Preliminary South American Datum 1956 (PSAD56):** El mismo que fue establecido a partir de coordenadas astronómicas y desviaciones de la vertical observadas en La Canoa, Venezuela, referidas al elipsoide internacional (Hayford). Su desviación en relación al geocentro es:  $X = -288$  m,  $Y = 175$  m,  $Z = -376$  m. (Drewes H., 2002).
- **South American Datum 1969 (SAD69):** También fue establecido por coordenadas astronómicas y desviaciones de la vertical pero observadas en Chua, Brasil, referidas al elipsoide internacional (Hayford). Sus desviaciones respecto al geocentro son:  $X = -57$  m,  $Y = 1$  m,  $Z = -41$  m. (Drewes H., 2002).
- **North American Datum 1983 (NAD83):** Éste dátum geocéntrico global con desviaciones respecto al geocentro  $\pm 2$  m. (Drewes H., 2002).

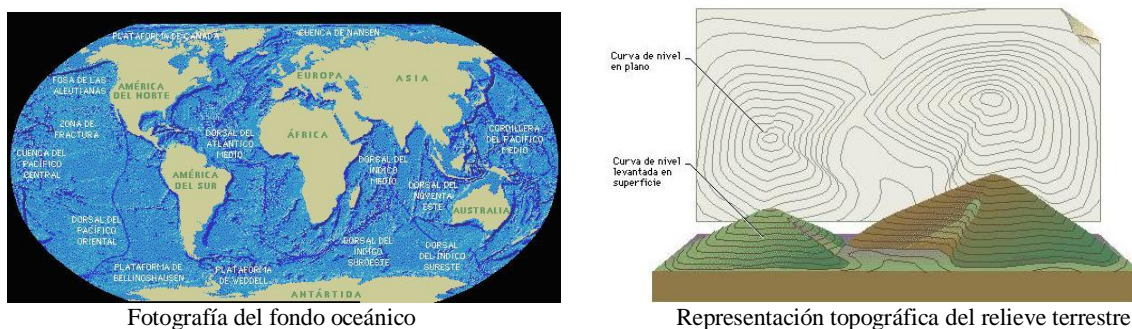
#### 2.1.4.SUPERFICIES DE LA TIERRA

Dentro del estudio de la Geodesia existen varias superficies de referencia que se estudian y analizan para determinar la forma de la tierra y su campo gravitatorio; por tanto podemos citar las siguientes:

##### 2.1.4.1. Superficie física de la Tierra:

La topografía de los terrenos, los elementos naturales y artificiales, se representan en los mapas gracias a los levantamientos geodésicos y otros. La *superficie física de la Tierra* es en donde se realizan los levantamientos geodésicos, topográficos, gravimétricos, batimétricos, etc., por tanto la superficie física de la Tierra es aquella superficie que esta constituida por su topografía y el fondo oceánico y que se encuentra influenciada por el campo de la gravedad. Ver figura 2.2

Figura 2.2 Superficie física de la Tierra



Fuente: Enciclopedia Encarta, 2005

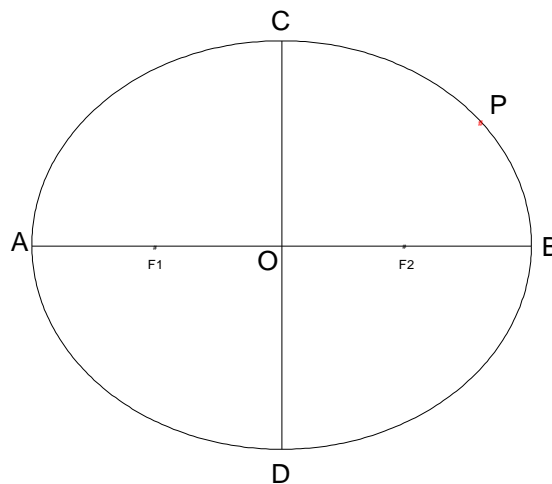
##### 2.1.4.2. Esferoide.

El *Esferoide*, se define como la superficie equipotencial coincidente con el nivel medio del mar para una Tierra rotante, en la cual, todas las masas son uniformemente distribuidas, es decir, una tierra donde todas las montañas y continentes han sido nivelados y donde los océanos han sido llenados hasta una profundidad uniforme. Esta Tierra imaginaria rotante tiene además la característica de poseer la misma masa y tamaño como la Tierra real. El esferoide por otra parte, es una superficie imaginaria de ninguna

significancia física, la cual tiene como única ventaja la de ser fácil de representar matemáticamente; el esferoide, es esencialmente, un *elipsoide* ovalado. (Badell C., 2006)

El *Elipsoide* viene dado a partir de una elipse meridiana, la cual define a un elipsoide o esferoide (elipsoide y esferoide son tratados como palabras equivalentes e intercambiables). Un elipsoide se forma cuando una elipse es rotada alrededor de su eje menor. En la práctica de la geodesia la definición de la elipse es normalmente mediante el semieje mayor y el achatamiento, *ver figura 2.3*. El achatamiento ( $f$ ) depende tanto del semieje mayor ( $a$ ) como del semieje menor ( $b$ ). (Hoar G., 1987)

Figura 2.3 Elipse y sus elementos



En donde:

OA = OB = a = semieje mayor. El eje mayor mide 2a

OC = OD = b = semieje menor. El eje menor mide 2b

F1, F2 = focos de la elipse

f = achatamiento polar

F1O = F2O = c = distancia focal. La distancia entre focos es 2c

P = punto sobre la elipse

La elipse puede ser también definida por su semieje mayor y excentricidad. La excentricidad ( $e$ ) está dada (Hoar G., 1987) por:

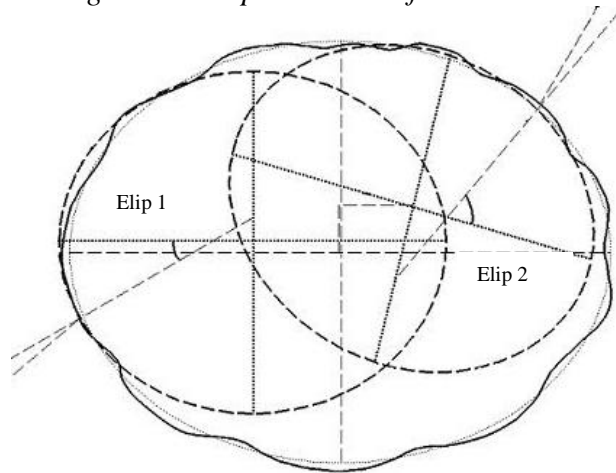
$$e^2 = \left(1 - \frac{b^2}{a^2}\right) = \left(\frac{a^2 - b^2}{a^2}\right) = (2f - f^2)$$

(2.1)

Antes del posicionamiento por satélite no era posible la utilización de un sistema geocéntrico de coordenadas. En su lugar, se usaban y aún se usan, sistemas coordenados locales cuyos elipsoides asociados se ajustaban mejor a la forma real de la Tierra en determinada región; y a pesar de que muchas veces se utilizaba el mismo elipsoide, las coordenadas en regiones fronterizas variaban cientos de metros como consecuencia de la diferente ubicación del elipsoide con respecto al centro de la Tierra, por

ejemplo el elipsoide de Hayford; a dichos elipsoides se los conoce como *elipsoides de referencia local*, ver figura 2.4

Figura 2.4 Elipsoides de referencia local



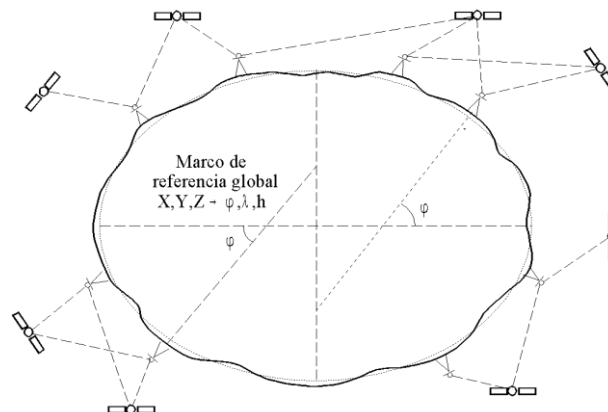
Fuente: Drewes H., 2002; modificado por Kirby E

En la figura 2.4, el dátum tanto del elipsoide de referencia local (Elip1) como el (Elip2), están en la superficie de la Tierra (topocentro1 y topocentro2 respectivamente).

Es así, que debido a los avances tecnológicos, al lanzamiento de satélites, etc., hoy en día existe una revolución en la definición de elipsoides de referencia globales referidos hacia el geocentro, de ahí que podemos definir los *elipsoides de referencia global*. Ver figura 2.5

Para tener las coordenadas (X, Y, Z) de un mismo punto referidos a un elipsoide de referencia local o referidos a uno global, es necesario realizar una transformación de los parámetros utilizados usando diferentes técnicas de obtención. Dado el caso de nuestro país, que tiene como sistema de referencia local el elipsoide de Hayford y si se quiere transformar a un sistema de referencia global, como el WGS 84, es necesario conocer los parámetros de los elipsoides de referencia, las ecuaciones de transformación y hoy en día conocer los siete parámetros de transformación, ver tabla 2.2

Figura 2.5 Elipsoide de referencia global



Fuente: Drewes H., 2002

**Tabla 2.2 Parámetros geométricos de los elipsoides de referencia WGS84 y PSAD56**

Parámetros DENOMINACIÓN	Elipsoides de Referencia:	
	Local	Geocéntrico
Elipsoide	Hayford	WGS 84
Dátum	PSAD 56	WGS 84
Referencia	Topocentro	Geocéntrico
Semieje mayor (a)	6378388 m	6378137 m
Semieje menor (b)	6356911.946 m	6356752.314 m
Achatamiento (f)	1*297	1/298.257223563

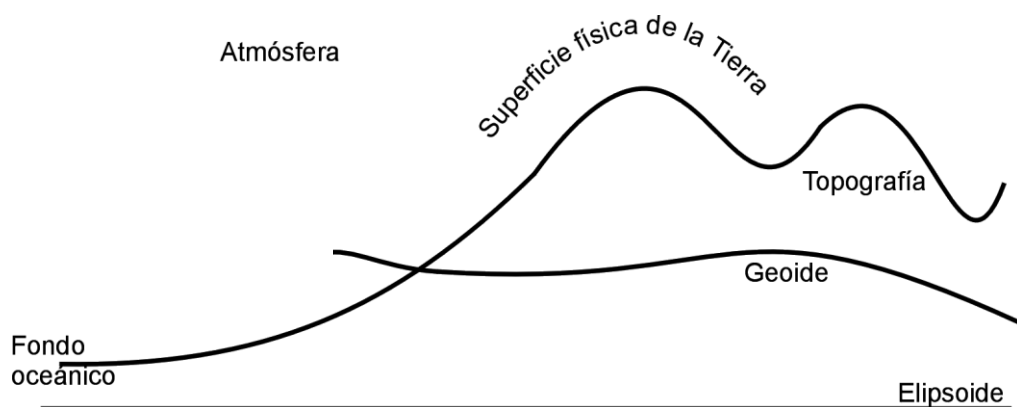
2.1.4.3. Geoide.

El *Geoide*, se define como la superficie equipotencial (superficie sobre la cual todos los puntos poseen el mismo potencial de gravedad) que coincide hipotéticamente con el nivel medio del mar (no perturbado) para una tierra real, difiriendo del esferoide precisamente en las irregularidades en la distribución de masas (montañas, continentes, océanos, rocas de densidad no uniformes). En áreas oceánicas, donde existe menos masa por unidad de área, el agua del mar siendo menos densa que la roca continental, hace que el geoide se situé por debajo del esferoide, mientras que una región montañosa, donde existe más masa por unidad de área, el geoide se sitúa por encima del esferoide (Badell C., 2006)

Además, el Geoide es una superficie de una significancia física considerable. La línea de la plomada, la cual define la dirección de la vertical en punto, es normal al geoide en todas partes, y el ángulo entre la vertical del punto y la normal al esferoide, representa la deflexión de la vertical.

Para entender y conocer algunas de las *superficies de la Tierra*, veamos una representación imaginaria de lo que son éstas superficies en la *figura 2.6*

*Figura 2.6 Superficies de la Tierra más utilizadas en Geodesia*



Fuente: Drewes H., 2002

## 2.2. ELEMENTOS TEÓRICOS DE LA GRAVEDAD

### 2.2.1. FUERZA DE ATRACCIÓN

La fuerza de la gravedad ( $\bar{g}$ ), cuya distribución por la superficie terrestre estudia la gravimetría, en cada punto dado es la resultante de la fuerza de atracción de Newton  $\bar{F}$ , de toda la masa de la Tierra y de la fuerza centrífuga ( $\bar{C}$ ), motivada por la rotación de la Tierra alrededor de su eje.

$$\bar{g} = \bar{F} + \bar{C} \quad (2.2)$$

En comparación con la fuerza de atracción, la fuerza centrífuga es pequeña, no está relacionada con la distribución de las masas en el planeta y puede ser fácilmente registrada. La componente esencial de la fuerza de gravedad es la fuerza de atracción, a cuyo análisis procedemos.

### 2.2.2. LEY DE LA GRAVITACIÓN UNIVERSAL

Según la ley de Gravitación Universal de Newton, dos partículas de masa  $m_1$  y  $m_2$ , separadas por una distancia  $d$ , ejercen cada una sobre la otra una fuerza de atracción  $\bar{F}$  cuya dirección es la recta que las une y cuya intensidad es:

$$\bar{F} = G \frac{m_1 m_2}{d^2} \quad (2.3)$$

Donde  $G = k$ , es la *constante de Gravitación Universal*, la misma que fue medida por primera vez por el físico británico Henry Cavendish, y el valor más preciso obtenido hasta la fecha para la constante es de 0,0000000000667 newtons-metro cuadrado por kilogramo cuadrado;  $6,67 \times 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ Kg}^{-2} = 6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{Kg s}^2$ . Esta constante representa la relación entre los comportamientos de una masa al ser atrayente o al ser atraída.

Con el cuadrado de la distancia en el denominador, el efecto de una masa  $m$  decrece rápidamente cuando la distancia  $d$  aumenta. Resultado de esto, sólo las masas más cercanas ejercen una influencia notable. Siendo el caso sobre la superficie terrestre (superficie física de la Tierra) de una masa  $m$ , resultará que sólo la masa de ésta interviene, ya que la atracción del Sol influye 0.05% respecto a la atracción de la Tierra y la de la Luna en 0.00035%, es decir que, las demás fuerzas de atracción (Ej. Sol) no se toman en cuenta a causa de su pequeñez o se estudian separadamente.

### 2.2.3. LA FUERZA DE GRAVEDAD

Un punto material situado en la Tierra o sobre su superficie experimenta la acción de la fuerza de atracción de la Tierra y de la fuerza centrífuga originada por la rotación del planeta, así como también de la fuerza de atracción de otros cuerpos celestes. El conjunto

de todas esas fuerzas constituye el *campo gravitatorio de la Tierra*. La medida del mismo, es su intensidad, que en gravimetría se denomina la *fuerza de la gravedad*  $g$ , y que es la fuerza que actúa sobre una unidad de masa.

Cualquier fuerza  $\vec{f}$  aplicada a un cuerpo de masa  $m$  se puede escribir:

$$\vec{f} = m \cdot \vec{g} \quad (2.4)$$

$\vec{g}$  es el *vector de la aceleración*, y tiene la misma dirección y sentido que  $\vec{F}$ . En el caso de la masa  $m$  en la superficie de la Tierra, su dirección es la dirección de la plomada o de la vertical (Heiskanen W. & Moritz H., 1985), *ver figura 2.7* y su valor es calculado por:

$$g = G \frac{M}{R^2} \quad (2.5)$$

En donde  $G$  es la constante de Gravitación Universal,  $M$  es la masa de la Tierra y  $R$  su radio. Entonces,  $g$  es la llamada aceleración de la gravedad o aceleración gravitacional, pero muy a menudo se dice que  $g$  es la “gravedad”;  $g$  tiene la dimensión física de una aceleración y se mide (unidad de medida) en gales ( $1 \text{ gal} = 1 \text{ cm} / \text{s}^2$ ), en honor a Galileo Galilei. Otra unidad que a menudo es conveniente usar en geodesia es el miligal, abreviadamente mgal ( $1 \text{ mgal} = 10^{-3} \text{ gal}$ ).

Para obtener el valor de la gravedad de un punto en la superficie terrestre, se utiliza un aparato llamado “Gravímetro”.

Ahora bien, vale la pena conocer un poco más de la fuerza centrífuga, la misma que surge como consecuencia del movimiento de rotación de una masa alrededor de un eje y está dirigida perpendicularmente al eje de rotación. *La aceleración centrífuga* es igual a la magnitud de la fuerza centrífuga que actúa sobre la unidad de masa:

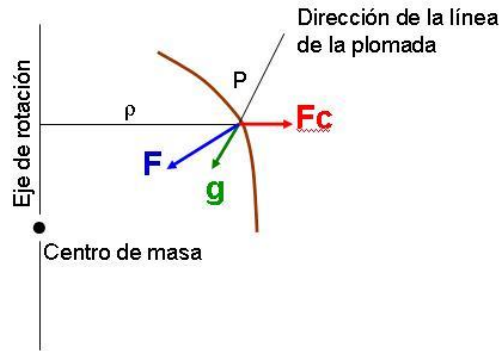
$$C = \frac{v^2}{\rho} = \omega^2 \rho \quad (2.6)$$

Donde  $\rho$  es la distancia desde el punto hasta el eje de rotación,  $v$  y  $\omega$ , son las velocidades lineal y angular respectivamente del punto.

Sobre la superficie de la Tierra, la fuerza centrífuga alcanza su valor máximo en el Ecuador, donde su magnitud igual a  $\omega^2 a$  (siendo  $a$  el radio ecuatorial). Al desplazarse desde el Ecuador hacia los polos, la fuerza centrífuga decrece hasta igualarse a cero en ellos. Así pues, la variación total de la fuerza de gravedad en la superficie de la Tierra es de 5 gal aproximadamente: desde  $g_e = 978 \text{ gal}$  en el Ecuador, hasta  $g_p = 983 \text{ gal}$  en el polo.

*Figura 2.7 Aceleración de la Gravedad (Gravedad)*





Fuente: Leiva C.; Robayo A., 2006

#### 2.2.4. GEOPOTENCIAL O POTENCIAL DE LA GRAVEDAD REAL

En Geodesia física, el estudio del geopotencial representa una teoría esencial para el mejor entendimiento de la forma de la Tierra, así como también para el análisis de las mediciones gravimétricas y su significado, la significancia de las diferentes alturas en la nivelación geodésica, que se verá más adelante en 2.4 “Sistema de Alturas”, y en general, de los métodos astrogravimétricos.

El potencial de la gravedad o *Geopotencial*  $W$  de un punto en coordenadas cartesianas geocéntricas en la rotación de la Tierra, está dado (Heiskanen W. & Moritz H., 1967) por:

$$W(X, Y, Z) = V(X, Y, Z) + \Phi(X, Y, 0) \quad (2.7)$$

Siendo  $V$  el potencial gravitacional de un cuerpo sólido, producido por la interacción entre las masas, dado por:

$$V(X, Y, Z) = G \iiint \frac{\rho(x', y', z') dx' dy' dz'}{l} \quad (2.8)$$

donde:

$l$  es la distancia entre el elemento de masa atrayente y el punto atraído;

$dx' dy' dz' = dv$  que es el volumen de la masa atrayente;

$\rho$  es la densidad de las masas atrayentes;

$G$  es la constante de Gravitación Universal.

Y  $\Phi$  es el potencial centrífugo, dado por:

$$\Phi = (X, Y, 0) = \frac{1}{2} \omega^2 (X^2 + Y^2) \quad (2.9)$$

donde:  $\omega$  es la velocidad angular de rotación de la Tierra.

Aplicando un operador gradiente (operador que se aplica a un escalar para funciones vectoriales) a (2.7), se obtiene el vector de la gravedad:

$$\vec{g} = \text{grad}(W) \quad (2.10)$$

$$\vec{g} = \frac{\partial W}{\partial X} i + \frac{\partial W}{\partial Y} j + \frac{\partial W}{\partial Z} k \quad (2.11)$$

Si se mira la expresión (2.7) del potencial de la gravedad  $W$ , y luego las expresiones (2.8) y (2.9), se ve que la parte más difícil de manejar es el potencial gravitatorio  $V$ , siendo el potencial centrífugo una simple función analítica.

El potencial gravitatorio  $V$  puede hacerse más manejable para muchos fines si se tiene en cuenta el hecho de que fuera de las masas atrayentes es una función armónica; por tanto, aplicando el operador de Laplace ( $\Delta$ ), en el exterior de la superficie terrestre, se cumple que:  $\Delta V=0$ , entonces  $V$  es una función armónica, y por tanto, puede ser desarrollada en términos de armónicos esféricos (siendo los coeficientes del desarrollo de armónicos esféricos por otra parte, los que describen el campo gravitatorio terrestre; además todos los modelos geopotenciales se basan en esta teoría). Por tanto, el potencial gravitatorio  $V$  es definido por un punto  $P$  mediante una distancia geocéntrica  $r$ , la co-latitud geocéntrica  $\theta$ , y la longitud  $\lambda$  (RAPP, 1994; en Tierra A., 2003) por:

$$V(r, \theta, \lambda) = \frac{GM}{r} \left[ 1 + \sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{a}{r} \right)^n \sum_{m=-n}^n C_{nm} \bar{Y}_{nm}(\theta, \lambda) \right] \quad (2.12)$$

donde:

$GM$  es la constante gravitacional universal geocéntrica;

$a$  es el semieje mayor del elipsoide de referencia;

$C_{nm}$  son los coeficientes plenamente normalizados de grado  $n$  y orden  $m$  del potencial gravitacional para el desenvolvimiento de los armónicos esféricos;

$\bar{Y}_{nm}$  son los armónicos esféricos de la superficie plenamente normalizados.

De forma similar para el potencial centrífugo se tiene:

$$\Phi = \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \sin^2 \theta \quad (2.13)$$

Siendo  $\omega$  la velocidad angular, y  $r$  y  $\theta$ , las coordenadas polares.

## 2.2.5. POTENCIAL DE LA GRAVEDAD NORMAL

Para su estudio, según Badell C. (2006), se puede considerar a la Tierra, como la figura de primera aproximación a la de una esfera, como segunda figura de aproximación, la de un elipsoide de revolución, mencionado en 2.1.4.2. Aunque la Tierra no es exactamente un elipsoide, el campo gravitatorio de un elipsoide es de una fundamental importancia práctica, ya que es fácil de manipular matemáticamente, además de que siendo las desviaciones del actual campo gravitatorio muy pequeñas en relación al campo para un elipsoide normal. La diferenciación entre el campo normal y un pequeño campo gravitatorio “perturbador”, simplifica considerablemente el problema para su determinación, lo que de otra forma resultaría muy complejo.

Por tanto, se asume por consiguiente, que la figura normal de la Tierra, es la de un elipsoide de revolución, el cual, es una superficie equipotencial, cuyo campo de gravedad es normal. Esta asunción es necesaria, ya que el elipsoide debe corresponder con la forma normal del Geoide, el cual, es una superficie equipotencial del actual campo gravitatorio.

Entonces, la Tierra como una aproximación, puede ser considerada como si fuese un elipsoide de revolución denominado como *la Tierra Normal*, cuyo centro coincide con el geocentro, el eje de rotación con el semieje menor, y que tiene la misma masa y velocidad angular de rotación que la Tierra real. Ésta superficie se considera equipotencial ( $U_o$ ) y de igual valor de Potencial sobre la superficie geoidal ( $W_o$ ).

El esferopotencial ( $U_o$ ) es igual a:

$$U_o = Z + \Phi \quad (2.14)$$

donde:

$Z$  es el potencial gravitacional del elipsoide;

$\Phi$  es el esferopotencial de rotación (potencial centrífugo), igual a la expresión (2.13)

Como  $Z$  cumple con la ecuación de Laplace, esta también puede ser representada por armónicos esféricos. El esfero potencial viene dado (Gemaël, 1999; en Tierra A., 2003) por:

$$U = \left( \frac{GM}{r} \right) \left[ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} J_{2n} \left( \frac{a}{r} \right)^{2n} P_{2n}(\theta) \right] + \frac{1}{2} \omega^2 r^2 \text{sen}^2 \theta \quad (2.15)$$

En donde,  $J_{2n}$  es el segundo término o armónico zonal,  $J_{2n}$  son los coeficientes zonales pares, y además éste segundo término es simétrico al ecuador; y es igual a:

$$J_{2n} = (-1)^{n+1} \left[ 1 - n + \frac{5n(C-A)}{Mc^2} \right] \frac{3e^{2n}}{(2n+1)(2n+3)} \quad (2.16)$$

Siendo:

$c$  es la semidistancia focal;

$e$  es la excentricidad principal;  
 $A, C$  los movimientos de inercia de la Tierra en relación con los ejes X e Y, respectivamente;  
 $M$  es la masa de la Tierra (incluida la masa atmosférica).

Aplicando un operador gradiente a  $U$ , se tiene el valor de la gravedad normal:

$$\bar{\gamma} = grad(U) \quad (2.17)$$

La magnitud de este vector es denominado como *gravedad normal*  $\bar{\gamma}$ , cuyo valor calculado sobre la superficie del elipsoide es dado por la fórmula Somigliana (Torgue, 1989; Lemoine, 1998; en Tierra A., 2003):

$$\gamma = \gamma_e \frac{1 + k \operatorname{sen}^2 \phi}{\sqrt{1 - e^2 \operatorname{sen}^2 \phi}} \quad (2.18)$$

Siendo  $k$  (no confundir  $G = k$  citado en 2.2.2) igual a:

$$k = \frac{b\gamma_p}{a\gamma_e} - 1 \quad (2.19)$$

donde:

$\gamma_e$  es la gravedad normal en el Ecuador, referido al elipsoide de referencia, e igual a 978032.53359 mgal en WGS 84;  
 $\gamma_p$  es la gravedad normal en el polo, y es igual a 983218.49378 mgal WGS 84;  
 $a, b$  son los semiejes del elipsoide;  
 $e$  es la primera excentricidad del elipsoide, igual a 0.0066943799901414 para WGS 84;  
 $\phi$  es la latitud del punto sobre el elipsoide.

Siendo  $e^2$  referido a la expresión (2.1) igual a:

$$e^2 = 2f - f^2 \quad (2.20)$$

y  $f$ , el achatamiento del elipsoide de referencia, igual a:

$$f = \frac{a-b}{a} \quad (2.21)$$

En donde,  $a$  es igual a 6378137 m y  $b$  es 6356752.314 m para el elipsoide de referencia WGS 84.  $b$ , también puede ser calculado utilizando la fórmula:

$$b^2 = a^2 - a^2 e^2 \quad (2.22)$$

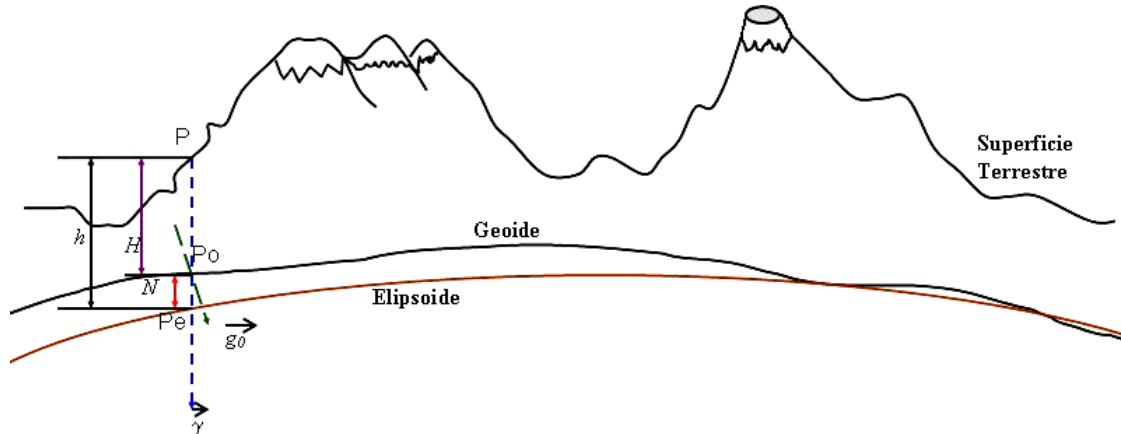
### 2.3. ANOMALÍAS DE LA GRAVEDAD

Si bien se conoce que el problema fundamental de la Geodesia Física, es la determinación del geoide a partir de medidas de la gravedad; confrontar directamente los valores medidos de la fuerza de gravedad es imposible, ya que a la par con la distribución heterogénea de las masas de la Tierra, en la magnitud del valor observado de la fuerza de gravedad influyen también la situación geográfica de los puntos de observación, su altura y el relieve circundante.

Al momento de analizar las mediciones gravimétricas generalmente representan de interés no los valores absolutos de la gravedad, porque están relacionados con toda la masa de la Tierra; sino únicamente los valores anómalos de la fuerza de gravedad  $\Delta g$ , ya que estos están relacionados con las variaciones geológicas locales de una zona de investigación entre otros factores.

La *Anomalía de la Gravedad* está definida como la diferencia entre la gravedad real ( $g_0$ ) en ( $P_0$ ) referido al Geoide y la gravedad normal ( $\gamma$ ) calculada en ( $P_e$ ) en el Elipsoide; ver la figura 2.8

Figura 2.8 Anomalía de la Gravedad



Fuente: Tierra A., 2003; modificado por Kirby E

Un vector esta caracterizado por su magnitud y su dirección. La diferencia en magnitud es la anomalía de la gravedad y la diferencia en dirección es la desviación de la vertical.

El valor de la anomalía se calcula (Heiskanen W. & Moritz H., 1967; Gemael, 1999; en Tierra A., 2003) a partir de la fórmula:

$$\Delta g = g_0 - \gamma \quad (2.23)$$

Esta magnitud anómala representa el alejamiento o separación de la gravedad real en el geoide en relación con la gravedad teórica normal en el elipsoide, por tanto, esta variación  $\Delta g$  es de fundamental importancia ya que es un elemento que relaciona a estas dos superficies.

El problema de los valores de la gravedad  $g$  radica en que estos son observados en la superficie física de la Tierra, en donde se realizan las mediciones con el gravímetro relativo o absoluto (gravedad observada) como en el caso del punto ( $P$ ) y no al geoide en ( $P_0$ ); mientras que el valor gravedad normal ( $\gamma$ ), se refiere al elipsoide de referencia en el punto ( $P_e$ ).

Las variaciones de la gravedad son debidas también a variables como la altitud, latitud, la topografía de los terrenos vecinos, el movimiento de la Luna y el Sol, etc.

Entonces, por lo anteriormente mencionado hay necesidad de hacer varios tipos de reducciones para obtener la gravedad referida al geoide y datos cuyas variaciones sean debidas a variaciones laterales de densidad en el subsuelo (variaciones geológicas laterales).

### 2.3.1. REDUCCIÓN DE LA GRAVEDAD

Según Heiskanen W. & Moritz H. (1985), la gravedad medida sobre la superficie física de la Tierra no es directamente comparable con la gravedad normal  $\gamma$  referida a la superficie del elipsoide. Por tal razón, es necesaria una reducción de  $g$  al nivel medio de los mares (geoide). Puesto que por encima del nivel del mar hay masas, los métodos de reducción difieren, dependiendo de la forma en que estas *masas topográficas* sean tratadas.

La reducción de la gravedad sirve de herramienta para tres objetivos principales:

1. Determinación del Geoide.
2. Interpolación y extrapolación de la gravedad.
3. Investigación de la corteza terrestre.

Sólo los dos primeros objetivos son de naturaleza geodésica directa; el tercero es de interés para los geólogos y geofísicos teóricos, quienes estudian la estructura general de la corteza, y también para la prospección geofísica, que investiga someras características que pueden indicar depósitos de minerales.

El uso de la fórmula para la determinación del geoide (fórmula de Stokes) requiere que las anomalías de la gravedad representen valores de contorno en el geoide, lo que implica que la gravedad  $g$  debe referirse al geoide; y que no debe haber masas fuera del geoide.

A pesar de la aparente sencillez, el tema de las reducciones no ha logrado hasta la presente una solución definitiva y siguen existiendo varios procedimientos de reducción propuestos por diversos autores.

Para alcanzar tales objetivos en la determinación del Geoide, si bien existen varios tipos de reducciones como: corrección de altura (reducción de aire libre), corrección de capa intermedia, la corrección por relieve circundante (corrección topográfica considerada

en las anomalías de Bouguer), corrección de Preyer, Isostasia, etc., las anomalías de Bouguer satisfacen bastante bien este requerimiento.

En el Ecuador se han realizado reducciones gravimétricas aplicando las Anomalías de Bouguer Simple y no las Completas, debido a la complejidad y falta de cálculo de la corrección del terreno, en virtud a lo expuesto en este proyecto de grado se propone una metodología para el cálculo de las Anomalías de Bouguer Completa (considera la corrección del terreno), para ello se necesita de:

### 2.3.2. ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE.

La anomalía de aire ( $\Delta g_{AL}$ ) es el resultado de la aplicación de la *Corrección de Aire Libre* ( $C_{AL}$ ), al valor de la gravedad ( $g$ ) para poder reducir esta gravedad al geode, y es dada por la fórmula:

$$\Delta g_{AL} = g + C_{AL} - \gamma \quad (2.24)$$

donde:

$g$  es el valor de la gravedad en la superficie terrestre (gravedad observada); en mgal;  
 $C_{AL}$  es la corrección de aire libre; en miligales (mgal);  
 $\gamma$  es la gravedad normal, que se puede obtener a partir de (2.18).

La corrección de aire libre para un punto con altura “ortométrica”  $H$  (Torgue, 1989; en Tierra A., 2003) es dado por:

$$C_{AL} = -\frac{\partial g}{\partial H} H \quad (2.25)$$

Siendo  $\partial g/\partial H$  el gradiente vertical de la gravedad; debido a su no conocimiento, según (Tierra A., 2003; Heiskanen W. & Moritz H., 1967) puede ser usado el gradiente de la gravedad normal ( $\partial\gamma/\partial h$ ), conceptos mencionados en (2.2.5); y en vez de  $H$  (ver “sistemas de alturas” (2.4)) una altitud nivelada  $Hn$  (en metros), obteniendo  $C_{AL}$  en miligales de la siguiente manera:

$$C_{AL} \cong -\left[ \left(\frac{\partial\gamma}{\partial h}\right)Hn + \frac{1}{2}\left(\frac{\partial^2\gamma}{\partial h^2}\right)Hn^2 \right] \quad (2.26)$$

Siendo:

$$\frac{\partial\gamma}{\partial h} = -\frac{2\gamma}{a}\left(1 + f - 2f\text{sen}^2\phi + \frac{3}{2}f^2 - 2f^2\text{sen}^2\phi + \frac{1}{2}f^2\text{sen}^4\phi\right) - 2\omega^2 \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial^2 \gamma}{\partial h^2} = \frac{6\gamma}{a^2 (1 - f \operatorname{sen}^2 \phi)^2}$$

(2.28)

Resolviendo las ecuaciones (2.27) y (2.28) para el Ecuador, con  $Hn$  en metros, se tiene que el valor aproximado de  $C_{AL}$  (mgal):

$$C_{AL} \cong 0.307716Hn - 7.21 \times 10^{-8} Hn^2$$

(2.29)

### 2.3.3. ANOMALÍAS DE BOUGUER COMPLETA

El objetivo de las anomalías de Bouguer de la gravedad es la eliminación completa de las masas topográficas, es decir, de las masas exteriores al geode.

Aun sobre una misma latitud, si se realizaran observaciones gravimétricas sobre la superficie de la Tierra pero a diferentes alturas, la variación de la gravedad con la altura para esos puntos no será correctamente determinada si usamos la ecuación (2.24) (Badell C., 2006), ya que debe considerarse el efecto de las masas adicionales para estaciones más altas.

Bouguer (1749) durante sus investigaciones por los Andes, determinó que la influencia de las masas situadas entre el nivel del mar (del geode) y el punto de observación se estima introduciendo la corrección por la capa intermedia. (Badell C., 2006; Mironov V.; 1977).

#### 2.3.3.1. Lámina de Bouguer (corrección por la capa intermedia).

Esta corrección se calcula suponiendo que la acción de las masas citadas equivale a la de una columna horizontal que se extiende en todas direcciones hasta el infinito, de espesor igual a la altura del punto de observación sobre el nivel del mar y con una densidad media constante.

En otras palabras, asuma que el área de la estación gravimétrica  $P$  es completamente plana y horizontal (*ver figura 2.9*), y que las masas entre el geode y la superficie de la Tierra tienen una densidad constante ( $p$ ). Entonces, la atracción  $C_B$  de esta lámina llamada *lámina de Bouguer* se obtiene haciendo  $C_B$  hacia el infinito  $\infty$ . Efectuando las reglas de cálculo se obtiene (Heiskanen W. & Moritz H., 1967; Mironov V; 1977):

$$C_B = 2\pi G p H n$$

(2.30)

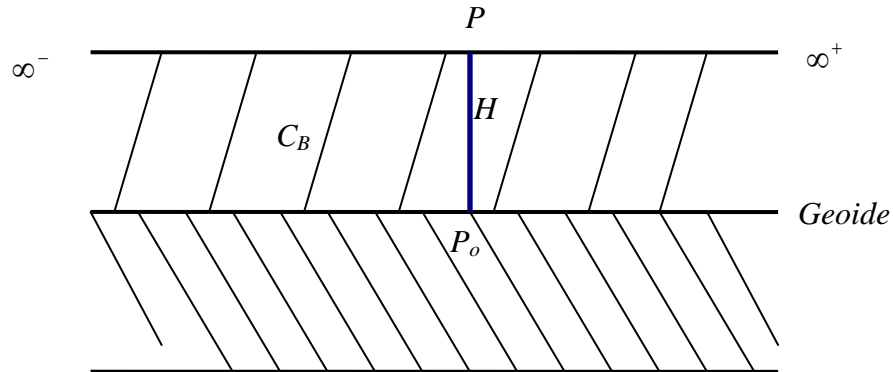
donde:

$C_B$  es la corrección de la lámina de Bouguer en mgal



$G$  es la constante de Gravitación Universal =  $6,672 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{Kg s}^2$ ;  
 $p$  es la densidad de las rocas de la capa intermedia ( $\text{Kg/m}^3$ ) entre el Geoide y punto observado;  
 $Hn$  es la altura nivelada del punto  $P$  respecto al nivel medio de los mares (en metros).

Figura 2.9 Lámina de Bouguer



Fuente: Heiskanen W. & Moritz H., 1967; modificado por Kirby E.

El quitar la lámina equivale a restar su atracción (2.30) de la gravedad observada. Esto se llama **reducción de Bouguer incompleta**. (Heiskanen W. & Moritz H., 1967).

Para completar nuestra reducción de la gravedad se debe bajar la estación gravimétrica de  $P$  al geoide, a  $P_o$ . Esto se hace aplicando las anomalías de aire libre (mencionadas en 2.3.2), aplicando las ecuaciones (2.26 o 2.29), se tiene:

$$gB = g + C_{AL} - C_B \quad (2.31)$$

Este proceso combinado de quitar las masas topográficas respecto a la lámina de Bouguer y aplicar la reducción de aire libre se llama **reducción de Bouguer simple** ( $gB$ ) (2.31).

Puesto que ahora  $gB$  se refiere al geoide, se obtiene las anomalías genuinas de la gravedad, como en (2.23), restando la gravedad normal  $\gamma$  referida al elipsoide, según (Heiskanen W. & Moritz H., 1967); se tiene:

$$\Delta g_B = gB - \gamma \quad (2.32)$$

Estas se llaman las **anomalías de Bouguer**. (Heiskanen W. & Moritz H., 1967). En este estudio se llamarán éstas anomalías, **anomalías de Bouguer simple o incompletas**.

Escrito la ecuación (2.32), utilizando (2.24 y 2.30), ésta ecuación también se escribir de la siguiente manera:

$$\Delta g_B = \Delta g_{AL} - 2\pi G p H n \quad (2.33)$$

En virtud de su eficiencia geológica, las anomalías de Bouguer aventajan indiscutiblemente a las de aire libre o reducciones de Faye (Mironov V; 1977). Dado que en la reducción de Bouguer la acción gravitatoria de las masas situadas entre el punto de observación  $P$  y las masas del nivel del mar se han eliminado, la dependencia de las anomalías de Bouguer con respecto a la altura de los puntos de observación es mucho menor que la de las anomalías de aire libre (Mironov V; 1977). Ello se debe a que, al estimar la acción de las masas intermedias como en la lámina de Bouguer, se introduce una reducción algo mayor que la acción real de estas masas. Para estimar plenamente todas las masas topográficas, hay que introducir una nueva corrección por la diferencia de forma entre dichas masas y la capa horizontal (lámina de Bouguer); ésta corrección se conoce como, *corrección topográfica o corrección del terreno*. (Heiskanen W. & Moritz H., 1967).

Según Gemael (Tierra A., 2003), la anomalía de Bouguer corresponde a la remoción de las masas topográficas que se encuentran encima del geoide. La **anomalía de Bouguer completa** ( $\Delta g_{BC}$ ), conocida también como **anomalía de Bouguer refinada**; viene dada por la siguiente fórmula:

$$\Delta g_{BC} = \Delta g_{AL} - 2\pi G p H n - B + C_T \quad (2.34)$$

donde:

$2\pi G p H n$  es la componente vertical de atracción (lámina de Bouguer) (2.30);

$\Delta g_{AL}$  es la anomalía de aire libre (2.24);

$B$  es la corrección debido a la Curvatura Terrestre en el plato (lámina) de Bouguer para una capa de la misma espesura, hasta una distancia de 166.735 Km. (Tierra A., 2003);

$C_T$  es la corrección del terreno (o efecto directo de la topografía), en relación a la capa hasta una distancia de 166.735 Km. (Tierra A., 2003).

Generalmente, la Corrección de Bouguer se ha obtenido con una densidad constante  $p = 2.67 \text{ gr/cm}^3$ . Más, existe una variación en la densidad que puede llegar a un 20% (Tierra A., 2003) especialmente en las regiones montañosas. Según Mironov (1977) al calcular las anomalías de Bouguer es de suma importancia considerar la densidad de la capa intermedia. Como el objetivo es aumentar la precisión del Geoide local, se hace indispensable considerar ésta variación, la misma que puede ser obtenida a partir de un Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD) por medio de información geológica, geofísica u otras fuentes (ver figura 2.10). El valor medio de la densidad puede ser calculado (Tierra A., 2003) por la fórmula:

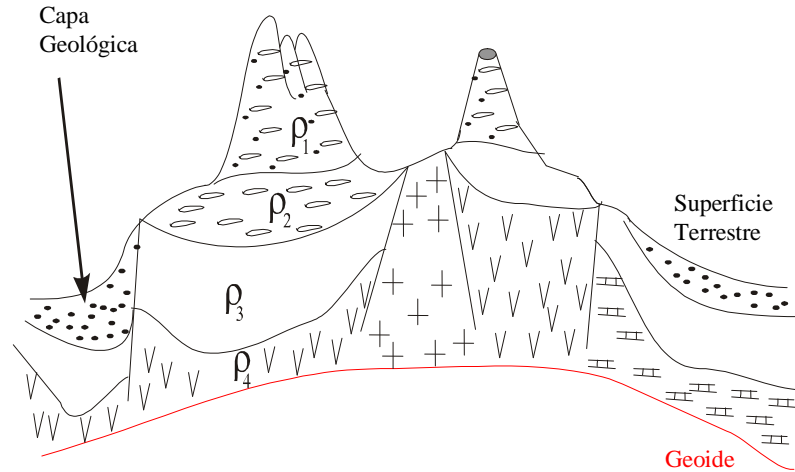
$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{nc} \rho_i P_i}{Hn} \quad (2.35)$$

donde:

$\rho_i$  es el valor de la densidad de cada capa geológica;

$P_i$  es el espesor medio de cada capa geológica;  
 $nc$  es el número de capas geológicas.

Figura 2.10 Capas Geológicas<sup>1</sup>



Fuente: Tierra A., 2003

El término  $B$  puede ser calculado mediante la fórmula (Vanicek, 2001; en Tierra 2001):

$$B = -8 \pi G \bar{\rho} \frac{Hn^2}{R} \quad (2.36)$$

### 2.3.3.2. Corrección del Terreno.

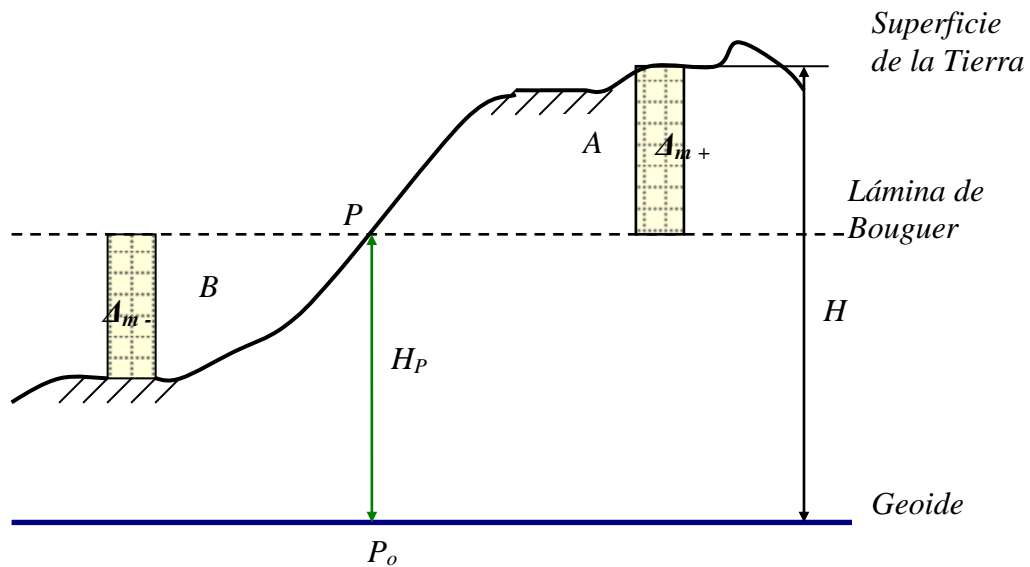
Ante todo según Mironov V. (2001), hay que advertir que tanto el descenso del relieve (insuficiencia de masas por debajo del punto de observación), como el ascenso del mismo (exceso de masas por encima del punto de observación), acarrearán una disminución del valor observado de la fuerza de gravedad.

Este proceso de refinamiento toma en cuenta las desviaciones de la topografía real respecto a la lámina (plato) de Bouguer de  $P$ , ver figura 2.11. Este proceso es llamado “corrección topográfica o corrección del terreno”. (Heiskanen W. & Moritz H., 1967). En  $A$  la masa sobrante  $\Delta_{m+}$ , que atrae hacia arriba, es eliminada, produciendo en  $P$  un incremento de la gravedad  $g$ . En  $B$  la masa deficiente  $\Delta_{m-}$  es añadida, produciendo en  $P$  también un aumento en  $g$ , por tanto, la corrección del terreno es siempre positiva.

La reducción de Bouguer y las correspondientes anomalías de Bouguer se llaman refinadas o simples según se haya o no aplicado la corrección del terreno (Heiskanen W. & Moritz H., 1967).

<sup>1</sup> Una capa interior, es el espesor limitado por la distancia media entre la superficie topográfica y el nivel medio de los mares (n.m.m) (Tierra A., 2003)

Figura 2.11 Corrección del Terreno



Fuente: (Heiskanen W. & Moritz H., 1967); modificado por Kirby E.

En la práctica, según Heiskanen W. & Moritz H. (1967), es conveniente descomponer la reducción de Bouguer y la corrección del terreno, porque la última es ordinariamente mucho menor. Incluso para montañas de 3.000 metros de altitud la corrección del terreno es sólo del orden de 50mgals (Heiskanen and Vening Meinesz, 1958; Heiskanen W. & Moritz H., 1967).

Según Heiskanen W. & Moritz H. (1967), la determinación práctica de la corrección del terreno  $C_T$  se hace por medio una plantilla de círculos concéntricos, aplicando una fórmula y sumando los efectos calculados de los compartimientos de los círculos concéntricos individuales. Luego de sumar la influencia de todos los sectores, se obtiene la corrección por influencia del terreno (corrección del terreno). Otros autores que proponen el mismo método, difieren unos de otros en dimensiones del radio de los anillos y del número de sectores de cada anillo. En la práctica según Mironov V. (1977), para acelerar el cálculo de las correcciones topográficas se usan tablas y nomogramas (conjunto de líneas acotadas que dan gráficamente los valores de una fórmula) especiales en función de los radios de los distintos anillos y de los valores de alturas. Diferentes autores (Hayford, Hammer, Lukáfchenco) han elaborado tablas y nomogramas de esta índole. La diferencia de los esquemas de cálculo como se dijo anteriormente, son únicamente la elección de los radios y del número de sectores de los anillos concéntricos, lo cual influye en la exactitud de las correcciones topográficas calculadas.

Además, para utilizar estas metodologías, es necesario disponer de mapas topográficos de distintas escalas (1:1.000; 1:2.000; 1:50.000; 1:500.000, etc.) (Mironov V; 1977). Según Haberstock E. (1985), varios métodos gráficos permiten el cálculo de la corrección topográfica, pero todos necesitan de un buen mapa topográfico (intervalos de 10 m o menos entre curvas de nivel).

De cualquier manera y método, el cálculo de la corrección del terreno consume un largo tiempo de trabajo, se necesita de un sin número de datos topográficos, etc. Razón por

la cual, es necesario sistematizar los métodos a través de un software y de la aplicación de métodos más modernos y menos costosos en dinero y tiempo.

Según Forsberg R. (1994) (Tierra A., 2003; Sansó F. 1994), la corrección esférica (término  $B$  en 2.34) puede ser evitada cuando se calcula la corrección del terreno mediante la integración numérica por prismas. Esta corrección considera las irregularidades de las masas topográficas relativas al plato de Bouguer (lámina de Bouguer). En coordenadas cartesianas esta corrección es dada por:

$$C_T = G \iint_{\tau} \int_{z=Hn_{(P)}}^{z=Hn} \frac{\bar{\rho}(z - Hn_{(P)})}{[(x_P - x)^2 + (y_P - y)^2 + (Hn_{(P)} - z)^2]^{3/2}} dx dy dz \quad (2.37)$$

donde:

- $\tau$  indica el área de integración;
- $Hn_{(P)}$  es la altura del punto  $P$  en donde se realizará el cálculo de  $C_T$ ;
- $Hn$  es la altura del punto móvil (punto que se traslada a lo largo del área de integración  $\tau$ );
- $x, y, z$  son las coordenadas del punto móvil;
- $x_P, y_P$  son las coordenadas del punto  $P$ .

Por lo anterior, utilizando el método de Forsberg para la  $C_T$ , las **anomalías de Bouguer completa** pueden ser calculadas así:

$$\Delta g_{BC} = \Delta g_{AL} - 2\pi G \bar{\rho} Hn + C_T \quad (2.38)$$

## 2.4. SISTEMAS DE ALTURAS

La búsqueda para la adecuada representación de las alturas no es algo trivial y la definición apropiada de un sistema de referencia vertical es esencial para muchas aplicaciones. En términos de la altura, la forma más natural para definir las es tomar una superficie horizontal como referencia para su registro; la superficie de referencia que surge de manera natural es la del agua, debido a su propiedad de mantenerse a si misma horizontal dondequiera que sea su posición en el espacio. La superficie del agua más importante es el nivel del mar; en otras palabras, la gravedad siempre es perpendicular a la superficie del agua (sólo para cuerpos de agua homogéneos y no perturbados).

El uso del nivel medio del mar como superficie de referencia vertical representa, tradicionalmente, una buena solución para el problema de las alturas, pues éste es accesible mundialmente y, en primera aproximación, coincidiría con el geode (Vanicek, et al., 2004). Sin embargo, debido al dinamismo oceánico del planeta, el mar presenta diferentes niveles que dependen de la variación temporal de la superficie del mar (presión atmosférica, temperatura oceánica, etc.) y de la posición geográfica (corrientes oceánicas, densidad del agua, etc.), lo que se traduce en diferencias de nivel hasta de dos metros (Sánchez L., 2005).

En un intento para fijar el nivel del mar en el tiempo, Listing (1873), estudiante de Gauss, introdujo el geoide, como la superficie que mejor representa el nivel medio del mar, en un estado no perturbado. El geoide es la superficie equipotencial básica del campo de gravedad de la Tierra.

La altura de un punto sobre la superficie terrestre es la distancia existente, sobre la línea vertical, entre éste y una superficie de referencia (dátum vertical, superficie utilizada para la definición de las alturas en una región geográfica (país, continente, etc.)). Su determinación se realiza mediante un proceso conocido como nivelación, ya sea, barométrica, trigonométrica, geométrica o espacial. Sin embargo, debido a la influencia del campo de gravedad terrestre en el proceso de medición, los resultados obtenidos deben ser cualificados involucrando correcciones gravimétricas. (Drewes H., et al., 2006).

Es así que además de las alturas referidas al nivel medio del mar, hay otro tipo de alturas que se estudian en el campo de la Geodesia, estas alturas se clasifican según su determinación, su aplicación y el modelo matemático o físico considerado en su definición. Dentro de este marco, se distinguen alturas de tipo geométrico y alturas de tipo físico.

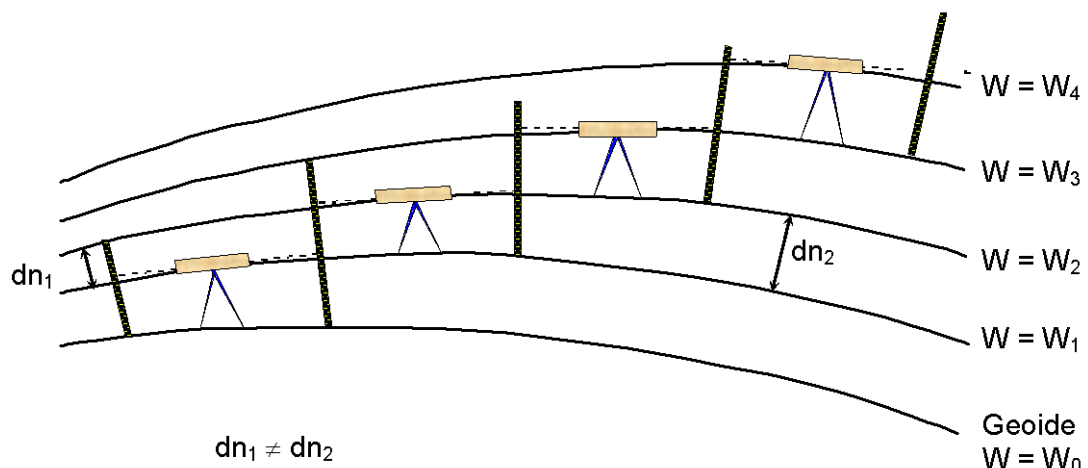
### 2.4.1. ALTURAS DE TIPO GEOMÉTRICO

Se distinguen dos tipos de alturas, las niveladas y las elipsoidales.

#### 2.4.1.1. ALTURAS NIVELADAS

Las alturas niveladas son aquellas alturas obtenidas bajo el proceso de nivelación geométrica con métodos ópticos de medición (Figura 2.12). Las diferencias de nivel observadas varían de acuerdo con el campo de gravedad inherente al sitio en consideración.

Figura 2.12 Alturas Niveladas



Fuente: Drewes H., 2002; modificado por Kirby E.

La distancia existente entre las superficies equipotenciales del campo de gravedad terrestre, cantidades observadas como (dn) y su sumatoria permiten conocer la diferencia de altura entre los puntos de interés. No obstante, debido a la distribución irregular de sus masas internas y a la forma elipsoidal de la Tierra, las superficies equipotenciales no son

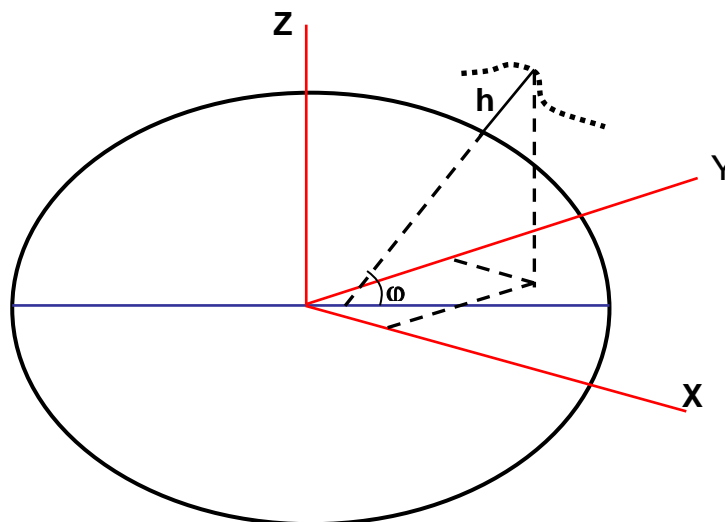
equidistantes; por tanto, los valores de desnivel entre éstas, varían de acuerdo con el trayecto de medición.

Como estas alturas dependen del camino descrito en el proceso de nivelación, fácilmente pueden obtenerse diferentes valores de altura para un mismo punto, haciendo que sean utilizadas en áreas pequeñas que no requieren considerar ni la figura elipsoidal de la Tierra ni las variaciones de su campo de gravedad. Su aplicación práctica es efectiva solo en redes locales con, aproximadamente, 10 Km. de extensión. (Drewes H, et al., 2006).

#### 2.4.1.2. ALTURAS ELIPSOIDALES

Las alturas elipsoidales ( $h$ ) representan la separación entre la superficie topográfica terrestre y el elipsoide. Dicha separación se calcula sobre la línea perpendicular al elipsoide. (Figura 2.13).

Figura 2.13 Alturas Elipsoidales



Fuente: Drewes H., 2002; modificado por Kirby E.

Las alturas elipsoidales son obtenidas a partir de las coordenadas geocéntricas cartesianas ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ) definidas sobre un elipsoide de referencia (p.ej. WGS 84 o GRS 80, los cuales en la práctica son iguales (Drewes H., et al., 2006)), determinadas por mediciones GPS y por los parámetros del elipsoide (el semieje mayor y la excentricidad).

Es indispensable considerar este tipo de alturas debido a la utilización masiva de la técnica GPS. Sin embargo, como éstas no consideran el campo de gravedad terrestre en su determinación, pueden presentar valores iguales de altura en puntos con niveles diferentes o viceversa; tal circunstancia exige que éstas sean complementadas con otro tipo de altura que sí considere el campo de gravedad terrestre.

#### 2.4.2. ALTURAS DE TIPO FÍSICO

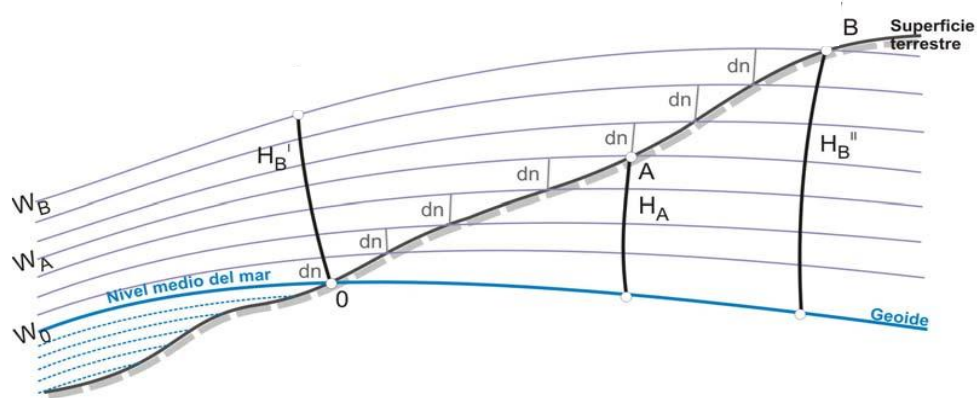
Dentro de las alturas de tipo físico se distinguen las alturas ortométricas, normales y dinámicas, para conocer estos tipos de alturas, se necesita conocer el concepto de números geopotenciales.

### 2.4.2.1. NÚMEROS GEOPOTENCIALES

Una manera de determinar las distancias reales entre las superficies de nivel es cuantificando sus diferencias de potencial, las cuales al ser sumadas en un circuito cerrado siempre serán cero y los resultados obtenidos, por diferentes trayectorias, serán iguales. Esto debido a que los valores de potencial son unívocos (tienen el mismo valor) y dependen solamente de la posición (Drewes H., et al., 2006). En la práctica, estas diferencias corresponden con los resultados de las nivelaciones clásicas combinadas con los valores de gravedad registrados en la zona de interés.

La diferencia de potencial entre cada punto de cálculo y el geode (principal superficie equipotencial del campo de gravedad terrestre) se conoce como **número geopotencial (C)** (ver figura 2.14)

Figura 2.14 Nivelación clásica y superficies equipotenciales diferentes.



Fuente: Sánchez L., 2005, modificado por Kirby E.

La figura representa la diferencia de niveles  $dn$  (citado también en 2.4.1.1) entre dos puntos A y B, ubicados en la superficie física de la Tierra y sobre equipotenciales diferentes ( $W_A$ ,  $W_B$ ). Si el punto inicial de medición 0 está sobre el geode ( $W_0$ ), la diferencia de potencial se conoce como *número potencial* o también dicho *cota geopotencial* y se define (Sánchez L., 2005) mediante:

$$C_B = W_0 - W_B = \int_0^B \hat{g} \cdot dn \cong \sum_0^B g \cdot dn \quad (2.39)$$

donde:

$\hat{g}$  se asume como el promedio del valor de gravedad medido sobre los dos puntos nivelados consecutivamente (Sánchez L., 2005);

$dn$  es la diferencia de altura;

$W_0$  es el potencial sobre el geode; y,

$W_B$  el potencial sobre la superficie que pasa sobre el punto de cálculo.



La dimensión de los números geopotenciales es  $[m^2/s^2]$ , la cual no representa una longitud, haciendo que su utilización en la práctica no sea conveniente. Estos números pueden ser expresados en unidades de distancia al ser divididos por algún valor convencional de gravedad (Drewes H., et al., 2006):

$$altura(H) = \frac{\text{número geopotencial } (C)}{\text{valor de la gravedad } (G)}$$

(2.40)

La clase de altura (H) obtenida al resolver la expresión 2.40, dependerá del tipo de gravedad (G) incluida. Si G corresponde con el valor medio de gravedad teórica (normal) entre la estación y la superficie de referencia, la altura calculada será normal. Mientras que, si G equivale a un valor constante de gravedad teórica para un punto arbitrario, H es conocida como altura dinámica. Finalmente, si G es igual al valor medio de gravedad real entre el geoide y la estación evaluada, la altura estimada es llamada ortométrica. (Drewes H., et al., 2006)

#### 2.4.2.2. ALTURAS DINÁMICAS

Las alturas dinámicas se calculan al dividir los números geopotenciales (C) por un valor constante de gravedad normal ( $\gamma_{cte}$ ):

$$H_{(DYN)} = \frac{C}{\gamma_{cte}}$$

(2.41)

La principal desventaja de este tipo de alturas está en que, por causa de la convergencia de las superficies equipotenciales (especialmente en dirección norte-sur, figura 2.12 o 2.14) la distancia geométrica entre ellas varía ostensiblemente ( $5 \times 10^{-3}$  unidades del ecuador a los polos), sin alterarse su altura dinámica. (Drewes H., et al., 2006) Por ejemplo, si se consideran dos superficies equipotenciales, cuya distancia geométrica es de 100 m en el Ecuador, su equivalencia en los polos será de 99,5 m, mientras que, su altura dinámica siempre será constante. (Drewes H., et al., 2006)

La ventaja de las alturas dinámicas radica en que valores iguales de éstas representan una superficie equipotencial del campo de gravedad; es decir, una superficie de agua en calma en cualquier elevación sobre el geoide tiene siempre la misma altura dinámica. Estas alturas se obtienen a partir de las niveladas, mediante la aplicación de correcciones que expresan los incrementos o decrementos en altura, generados por involucrar un valor constante de gravedad. (Drewes H., et al., 2006)

#### 2.4.2.3. ALTURAS ORTOMÉTRICAS

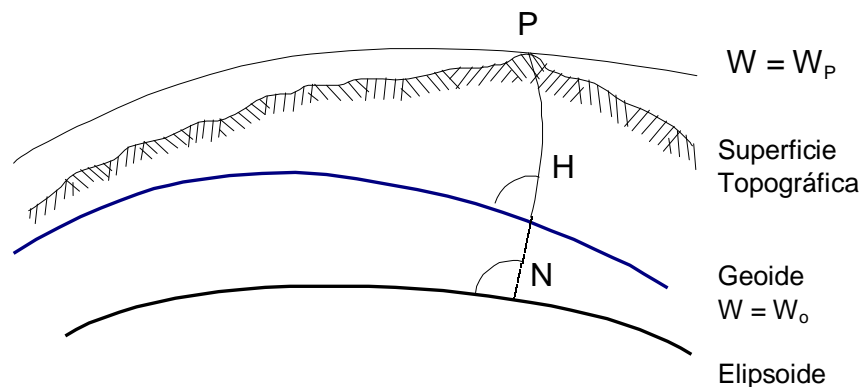
Partiendo del concepto de *Geoide*, que es la superficie del campo de la gravedad terrestre, su estimación requiere de la formulación de hipótesis sobre la distribución de las masas internas (Drewes H., et al., 2006), (ver más sobre geoide en 2.1.4.3). La *altura ortométrica* se define como la distancia vertical entre la superficie física de la Tierra y la

superficie del geode (Vanicek, et al., 2004). Esta distancia se mide a lo largo de la línea de la plomada, la cual es la curva que es tangencial a la dirección de la gravedad en cualquier punto. La línea de la plomada no es una línea recta, ya que tiene una leve curvatura y giro, ya que la dirección de la gravedad varía dependiendo de las características de la densidad local. (Vanicek, et al., 2004).

Para evaluar la altura ortométrica con exactitud es necesario conocer el valor medio de la gravedad a lo largo de la línea de plomada. En virtud de que la gravedad a lo largo de la línea de plomada no puede ser medida, el valor medio de la gravedad tiene que ser estimado de la gravedad observada en la superficie de la Tierra aceptándose alguna hipótesis sobre la distribución topográfica de la masa y densidad. (Vanicek, et al., 2004). Los métodos más comunes en la determinación de alturas ortométricas corresponden con las hipótesis de Helmert, Vignal, Baranov y Aire Libre. (Vanicek, et al., 2004; Drewes H., et al., 2006).

En el cálculo de las alturas ortométricas ( $H$ ), los números geopotenciales ( $C$ ) son divididos por el valor medio de la gravedad verdadera, entre el punto evaluado y el geode; (ver figura 2.15). Como se dijo anteriormente, el inconveniente que presentan estas alturas se basa en que no es posible calcular  $g_m$ .

Figura 2.15 Alturas Ortométricas



Fuente: Drewes H.; 2002

La formula de cálculo de estas alturas (Drewes H., et al, 2006) es:

$$H = \frac{C}{g_m} \quad (2.42)$$

donde:

$g_m$  es el valor medio de la gravedad verdadera a lo largo de la línea de la plomada.

Las correcciones ortométricas que se aplican a las alturas niveladas están en el mismo orden a las alturas normales (alturas normales se verán en 2.4.2.4).

Las alturas ortométricas pueden obtenerse a partir de las elipsoidales mediante la sustracción de las *ondulaciones geoidales*  $N$  (Drewes H., et al., 2006), así:

$$H = h - N \quad (2.43)$$

donde:

$h$  es la altura elipsoidal; y,  $N$  la ondulación geoidal.

Tanto en la determinación de  $N$ , como de  $g_m$  (ecuación 2.42) y en la estimación de las correcciones ortométricas, se requiere de una hipótesis sobre la distribución de densidades de las masas terrestres.

#### 2.4.2.4. ALTURAS NORMALES

Para definir y calcular las alturas normales es necesario enfatizar en dos superficies de referencia que no han sido mencionadas en este capítulo, las mismas que están estrechamente relacionadas con la concepción de las alturas normales.

- *Cuasigeoide*.- esta superficie llamada por Molodensky (Heiskanen W. & Moritz H., 1985) cuasigeoide, es una superficie no equipotencial (no es una superficie de nivel) que no tiene significado físico alguno, muy cercana al geode. Su determinación no requiere de hipótesis geofísicas y se basa en el modelamiento matemático del campo de la gravedad. (Drewes H., et al., 2006).
- *Teluroide*.- también es una superficie auxiliar de referencia, la cual se define según Hirvonen (1960, 1961), como la superficie cuyo potencial normal  $U$  en todo punto  $Q$  es igual al potencial real  $W$  en el correspondiente punto  $P$ , de modo que  $U_Q = W_P$ , estando los puntos correspondientes  $P$  y  $Q$  situados sobre la misma normal elipsoidal; *ver figura 2.16*.

En un intento para desviar algunas de los posibles defectos de las alturas ortométricas, Molodensky (1945; 1948) sugirió el uso de alturas normales. Las alturas normales son una aproximación a las alturas ortométricas, describiendo las alturas sobre una superficie ficticia, el cuasigeoide.

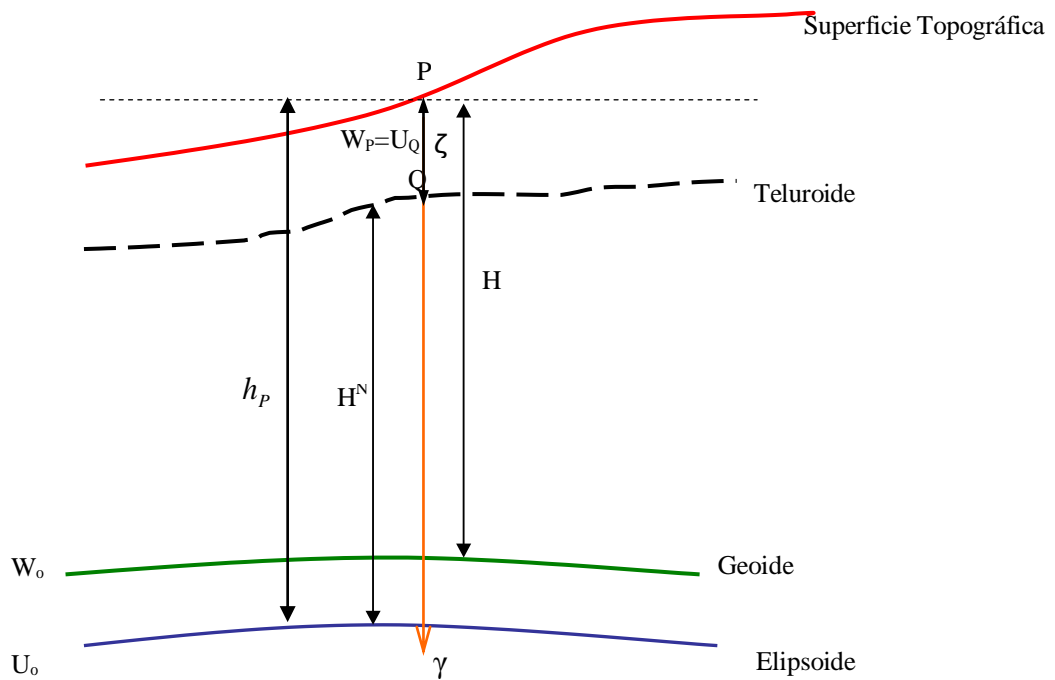
En las alturas normales los números geopotenciales no son divididos por un valor constante de gravedad (como en las alturas dinámicas) sino, por el valor medio de la gravedad normal entre la superficie de referencia (denominada cuasigeoide) y el punto en consideración ( $\gamma_m$ ) (Figura 2.17):

$$H^N = \frac{C}{\gamma_m} \quad (2.44)$$

donde:

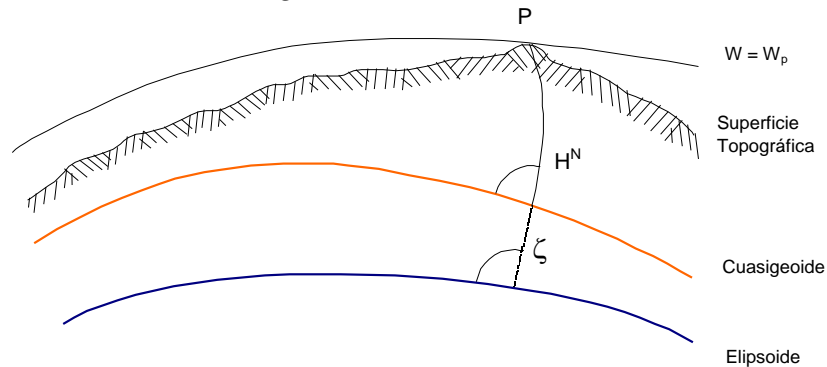
$\gamma_m$  = es el valor medio de la gravedad normal; es decir el valor de la gravedad normal  $\gamma$ , que se obtiene a través de la fórmula (2.18).

Figura 2.16 Teluroide



Fuente: Heiskanen W. & Moritz H., 1985; modificado por Kirby E.

Figura 2.17 Alturas Normales



Fuente: Drewes H., 2002

Las correcciones normales que se aplican a las alturas niveladas son más pequeñas que las de las alturas dinámicas, ya que  $\gamma_m$  considera la convergencia de las superficies equipotenciales y también las correcciones normales aplicadas a las alturas niveladas están en el mismo orden que las utilizadas para la obtención de las ortométricas. Sin embargo, la diferencia entre alturas ortométricas y normales (y con esto entre el geoide y el cuasigeoide) depende de la discrepancia entre la gravedad verdadera modelada a través de alguna hipótesis y la gravedad normal, pudiéndose alcanzar valores de decímetros en estas diferencias. (Drewes H., et al., 2006)

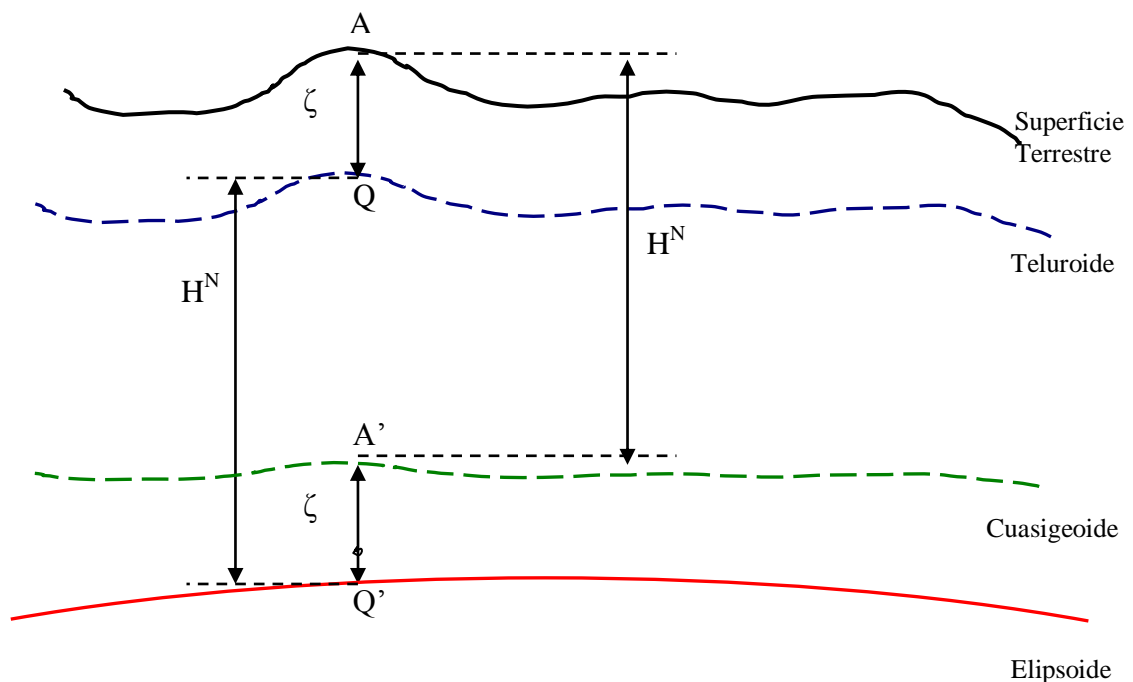
De acuerdo con lo expuesto, estas alturas pueden obtenerse a partir de las elipsoidales si se les descuenta la ondulación del cuasigeoide, la cual es conocida como *anomalía de altura o altura anómala* ( $\zeta$ ):

$$H^N = h - \zeta \quad (2.45)$$

En donde  $\zeta$ , se obtiene a partir de los cálculos geoidales realizados por métodos gravimétricos o satelitales.

De acuerdo con la ecuación 2.45, la anomalía de altura se define como la distancia a lo largo de la normal elipsoidal entre el cuasigeoide ( $\overline{A'Q'}$ ) y el elipsoide referencia, o alternativamente, como la distancia entre la superficie de la Tierra y el teluroide ( $\overline{AQ}$ ). (Vanicek, et al., 2004). (Figura 2.18)

Figura 2.18 Anomalía de Altura o Altura Anómala



Fuente: Sevilla M.; Núñez A., 2006; modificado por Kirby E.

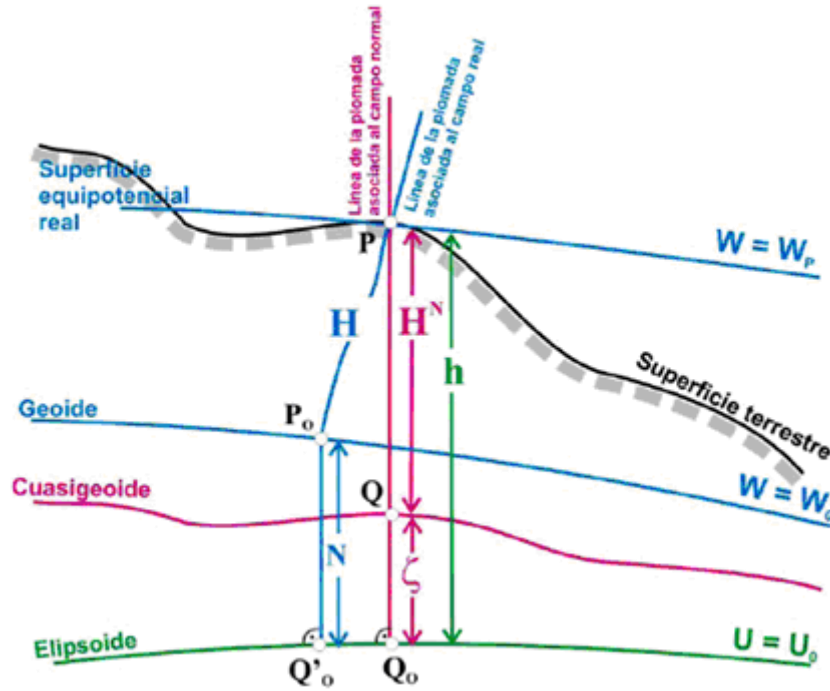
Revisando la figura 2.18, se tiene que la distancia vertical del elipsoide al teluroide es la altura normal  $H^N$  (Heiskanen W. & Moritz H., 1985) o la altura normal es la altura referida al cuasigeoide (Sánchez L., 2005).

La introducción de la altura normal elimina la necesidad de conocer la densidad de la topográfica terrestre (topo-densidad). Este hecho permite que la altura normal sea calculada exactamente (como exactamente pueda ser determinado el número geopotencial basado en gravedad actual) debido a que no requiere ningún conocimiento sobre la distribución de la densidad topográfica. (Vanicek, et al., 2004).

De acuerdo a Heiskanen y Moritz (1967), la relación entre las alturas ortométricas y normales está aproximadamente definida como una función lineal de la anomalía de gravedad simple de Bouguer. (Vanicek, et al., 2004).

Finalmente, definidos los tres diferentes tipos de alturas y sus superficies de referencias, se describe a continuación en la *tabla 2.3* un resumen de las características, formulas, etc., de cada una de estas alturas; y de forma gráfica las alturas (elipsoidales, ortométricas, normales, etc.) con sus superficies de referencia (*Figura 2.19*)

Figura 2.19 Tipos de alturas y sus superficies de referencia.



Fuente: Sánchez L., 2005

**Tabla 2.3 Características principales de los diferentes tipos de alturas físicas**

**Fuente: Sánchez L., 2005**

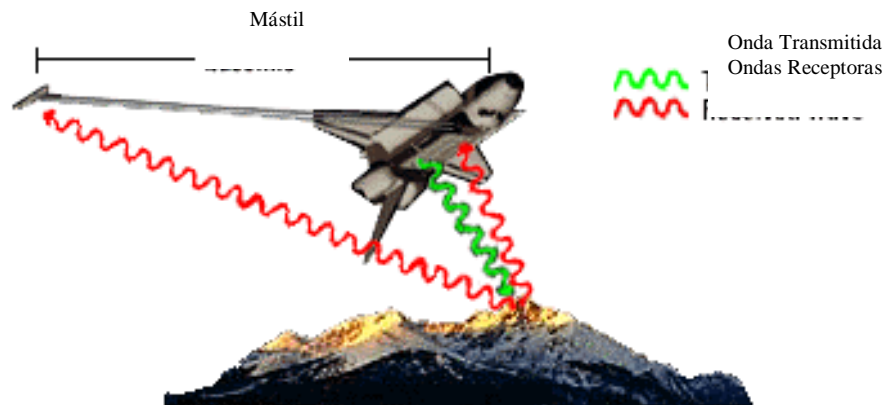
	<b>Alturas dinámicas</b>	<b>Alturas ortométricas</b>	<b>Alturas normales</b>
Definición de $\hat{g}$	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\gamma_{cte}</math>: Valor de la gravedad normal sobre el elipsoide para una latitud <math>\theta</math> específica (Normalmente: <math>\theta = 45^\circ</math>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>g_m</math>: Valor promedio de la gravedad real medida a lo largo de la línea de la plomada entre el geode y el punto de observación.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li><math>\gamma_m</math>: Valor medio de la gravedad normal a lo largo de la línea de la plomada teórica (normal al elipsoide) entre el cuasigeoide y la superficie terrestre</li> </ul>
Descripción	<ul style="list-style-type: none"> <li>Números geopotenciales escalados</li> </ul> $H_{(DYN)} = \frac{C}{\gamma_{\theta}^{45}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distancia, sobre la línea de la plomada real, entre el geode y el punto de observación (figura 2.19)</li> </ul> $H = \frac{C}{g_m} ; g_m = \frac{1}{H} \int_0^H g dH$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Distancia, sobre la línea de la plomada teórica, entre el cuasigeoide y el punto de observación (figura 2.19)</li> </ul> $H^N = \frac{C}{\gamma_m} ; \gamma_m = \frac{1}{H^N} \int_0^{H^N} \gamma dH^N$
Corrección	<ul style="list-style-type: none"> <li>Magnitudes hasta de 20 m</li> </ul> $\Delta H_{AB}^{DYN} = \Delta n_{AB} + k_{AB}^{DYN}$ $k_{AB}^{DYN} = \int_A^B \frac{g - \gamma_{cte}^{45}}{\gamma_{cte}^{45}} \delta n = \sum_A^B \frac{g - \gamma_{cte}^{45}}{\gamma_{cte}^{45}} \delta n$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Magnitudes en el orden de [mm] a [dm]</li> </ul> $\Delta H_{AB} = \Delta n_{AB} + k_{AB}$ $k_{AB} = \int_A^B \frac{g - \gamma_{cte}^{45}}{\gamma_{cte}^{45}} \delta n + \frac{g_m^A - \gamma_{cte}^{45}}{\gamma_{cte}^{45}} H_A - \frac{g_m^B - \gamma_{cte}^{45}}{\gamma_{cte}^{45}} H_B$	<ul style="list-style-type: none"> <li>Magnitudes en el orden de [mm] a [dm]</li> </ul> $\Delta H_{AB}^N = \Delta n_{AB} + k_{AB}^N$ $k_{AB}^N = \int_A^B \frac{g - \gamma_{cte}^{45}}{\gamma_{cte}^{45}} \delta n + \frac{\gamma_m^A - \gamma_{cte}^{45}}{\gamma_{cte}^{45}} H_A^N - \frac{\gamma_m^B - \gamma_{cte}^{45}}{\gamma_{cte}^{45}} H_B^N$
Particularidades	<ul style="list-style-type: none"> <li>No tienen significado geométrico</li> <li>Puntos sobre la misma superficie equipotencial tienen el mismo valor de altura dinámica</li> <li>No se requiere de la formulación de hipótesis para su determinación</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Su superficie de referencia es el geode</li> </ul> $H = h - N$ <p><math>h</math>: altura elipsoidal, <math>N</math>: ondulación geoidal</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Puntos sobre la misma superficie equipotencial difieren en la misma proporción en que varían los valores de <math>g_m</math></li> <li>Se requiere de la formulación de hipótesis sobre la densidad las masas terrestres internas y sobre el gradiente vertical de gravedad (<math>\partial g / \partial H</math>)</li> <li><math>g_m</math> puede determinarse sólo de manera aproximada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Su superficie de referencia es el cuasigeoide</li> </ul> $H^N = h - \zeta$ <p><math>h</math>: altura elipsoidal, <math>\zeta</math>: altura anómala</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>Puntos sobre la misma superficie equipotencial y a la misma latitud (paralelo), tienen alturas normales idénticas, de lo contrario, éstas varían según el cambio de <math>\gamma_m</math> con respecto a la latitud</li> <li>No se requiere de la formulación de hipótesis para su determinación</li> <li><math>\gamma_m</math> puede determinarse con exactitud</li> </ul>

## 2.5. SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION “SRTM”

El SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION (SRTM) fue un proyecto conjunto entre la National Imagery and Mapping Agency (NIMA) actualmente llamada National Geospatial Intelligence Agency (NGA), la National Aeronautics and Space Administration (NASA) y las Agencias Espaciales de Alemania (DLR) e Italia (ASI). La misión se desarrolló durante 11 días del mes de Febrero del 2000, y el objetivo fue generar datos digitales topográficos para el 80% de la superficie de la tierra (el área entre 60° Norte y 56° Sur), con puntos ubicados en una grilla de 1 arco-segundo (aproximadamente 30 metros) en latitud y longitud. (<ftp://edcs9.cr.usgs...srtm/>; <http://edcsns17.cr.usgs...>)

La misión del SRTM consiste en un sistema de radar especialmente modificado que vuela a bordo de la nave Shuttle Endeavour. El SRTM utilizó una técnica llamada interferometría radar, en la cual dos imágenes radar son tomadas de un mismo sitio desde dos posiciones diferentes. Para captar las imágenes, la nave Endeavour fue lanzada a una órbita a 235 kilómetros de altura y con una inclinación de 57 grados, lo que ha permitido a los radares hacer barridos del 80% de la superficie terrestre. La nave empleó dos antenas de radar con las que realizó una medición cada 30 metros. La primera de las antenas estaba alojada en la bodega de la nave (antena emisora y receptora); la segunda, en un mástil desplegado de 60 metros (receptora). El hecho de emplear dos ingenios separados que fotografían de manera simultánea el planeta ha permitido obtener información sobre la altura de los accidentes geográficos que se captaban. (*Figura 2.20*)

*Figura 2.20 Señales del Radar siendo transmitidas y recibidas en la misión SRTM*



Fuente: <http://www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/Agprecis/comp03.htm>

La técnica (llamada interferometría) es similar a la que empleamos los humanos para ver en tres dimensiones: la superposición de dos imágenes captadas desde puntos de vista levemente distintos.

Los mapas resultantes, que se denominan modelos digitales del terreno, se forman a partir de tres puntos: dos en superficie (latitud y longitud) y uno en altura. Un programa informático traduce esos datos a una imagen tridimensional.

Entre los objetivos de la misión de SRTM está el obtener datos del radar de la elevación sobre una escala cercano-global y generar la base de datos topográfica digital de



alta resolución más completa de la tierra. (<http://seamless.usgs...gov>; <http://www.belt...htm>); producir productos topográficos digitales del mapa con una precisión horizontal de 20 m con un nivel de significancia del 90% y de precisión vertical absoluta de 16 m de altura para un nivel de significancia igual al anteriormente mencionado. Otro es, que en misiones futuras, y utilizando una tecnología similar, se podrá efectuar un seguimiento a largo plazo de los cambios en la topografía terrestre e incluso elaborar mapas de la topografía de otros países, explicó John LaBrecque, jefe del programa de Riesgos Naturales de la NASA (<http://www.geocities.com/CapeCanaveral/1526/shuttle.html>).

El Digital Elevation Model (DEM) del SRTM es una matriz uniforme que representa un índice de puntos específicos de elevación de la superficie terrestre. El datum horizontal, el World Geodetic System 1984 (WGS84) y el datum vertical esta referido al nivel medio de los mares determinado por el WGS84 Earth Gravitational Model (EGM96). Los datos de elevación son con respecto a la superficie reflectiva de la Tierra, pudiendo ser vegetación, rasgos artificiales (Ej. Edificaciones) o suelo desnudo. (U.S Department of the Interior). (Ver tabla 2.4)

<b>Tabla 2.4 Algunos detalles técnicos del DEM del SRTM</b>	
<b>Resolución:</b>	3 arcos de segundos (aproximadamente 90 Metros)
<b>Fecha:</b>	1999
<b>Proyección:</b>	Geográfica (Lat/Long)
<b>Formatos:</b>	USGS DEM, DXF Mesh, GeoTIFF, ASCII XYZ, Arc ASCII Grid, RockWorks, Terragen and Surfer Grid (Binary or ASCII)
<b>Batimetría:</b>	No
<b>Precisión Horizontal:</b>	De +/- 20 m (nivel de confianza del 90%)
<b>Precisión Vertical:</b>	De +/- 16 a +/-18 m (nivel de confianza del 90%)
<b>Superficie Reflejada:</b>	Vegetación, edificios, suelo desnudo, etc.
<b>Datum Horizontal:</b>	WGS84
<b>Datum Vertical:</b>	n.m.m referido al WGS84 Earth Gravitational Model (EGM96)
<i>Fuente: <a href="http://66.77.122.13/Intern...M/SRTM90.htm">http://66.77.122.13/Intern...M/SRTM90.htm</a>; <a href="mailto:AgencyNIMA...tesgatesj@nima.mil">AgencyNIMA...tesgatesj@nima.mil</a></i>	

El USGS (United States Geological Survey) es el responsable de publicar la información recolectada en esta misión, previo su procesamiento. A partir de Junio del 2003 se pusieron a disposición del público los datos para América del Sur, con una resolución de 90 metros de tamaño de grilla. La resolución de las imágenes del SRTM según sea su versión van desde los 30 (1 arco de segundo aprox.) a los 90 metros en horizontal (3 arcos de segundo aprox.) y entre los 6 y los 16 metros en vertical aproximadamente. (<http://seamless.usgs.gov>; <http://recursos.gabrielortiz.com>; U.S Department of the Interior). Los mapas más detallados están reservados para usos del Ejército de Estados Unidos y para investigaciones científicas, previa autorización del Departamento de Defensa de EE UU.

El DEM del SRTM (3 arcos de segundo) se arregla en porciones (azulejos) de 1° de latitud x 1° de longitud, nombrados de acuerdo a sus esquinas sur oeste. Ej. "n01w78", significa que la imagen va desde los 01°00' Norte, 78°00' Oeste a los 02°00' Norte, 77°00' Oeste. Dentro de cada porción hay 1201 filas x 1021 columnas; es decir 1201 x 1201 píxeles; es un modelo de 16 Bits ([http://es.wikipedia.org/...%C3%A1fica\\_Radar\\_Shuttle](http://es.wikipedia.org/...%C3%A1fica_Radar_Shuttle)).

La NASA ofrece dos tipos de información del SRTM. Por un lado las imágenes en bruto, tal y como las suministró el procesador de los datos obtenidos por los radares. Estas imágenes están destinadas a usos científicos y contienen áreas vacías (sin datos) y otro tipo de características que deben ser interpretadas por especialistas. Por otro lado se pueden adquirir imágenes y visualizaciones creadas a partir de los datos originales, que son las que se reproducen como se dijo anteriormente por el USGS. (<ftp://e0dps01u.ecs.nasa.gov/srtm>). Además, dentro del modelo hay otros puntos con valores anómalos (bajos y altos valores). Por Ej. Los cuerpos de agua no estarán bien definidos, puesto que sus superficies son de baja reflectividad y generalmente son muy ruidosas (perturbación en la señal) y por tanto, las líneas de costa no estarán bien definidas. (<http://seamless.usgs.gov>; <http://edcsns17.cr.usgs.gov>...).

Sin embargo, los datos finalizados del SRTM han sido editados de la siguiente manera: los picos y los bajos de la señal de los datos fueron detectados y evitados si ellos superan los 100m comparados con las elevaciones circundantes. Los pequeños vacíos fueron llenados a través de la interpolación de los valores de elevaciones circundantes. Los grandes vacíos son dejados en los datos, estos vacíos pueden ser causados como se dijo anteriormente por sombras, propiedades de poca reflectividad de la superficie terrestre o excesivo ruido en los datos.

Los cuerpos de agua son categorizados en el SRTM de la siguiente manera: las elevaciones del océano son fijadas en cero metros, los lagos de 600 m de diámetro o de mayor extensión son aplanados fijándose una elevación constante, los ríos que exceden los 183 m de ancho son delineados y graduados descendiendo su altura uniformemente, las islas son descritas o dibujadas siempre y cuando su eje mayor exceda los 300 m o su relieve sea mayor a 15 m. (U.S Department of the Interior & U.S Geological Survey "USGS")

Aunque, la cantidad sin datos no es mayor al 0.2% del total explorado, existen varias bases de datos SRTM, que pueden completar los vacíos, pero sólo algunos de ellos se pueden completar por interpolación de datos vecinos, y aún así podrán ser muy irreales. Si los huecos son grandes, o completamente cubiertos de alturas de áreas rocosas, ningún algoritmo de interpolación dará resultados satisfactorios. ([http://es.wikipedia.org/wiki/...Radar\\_Shuttle](http://es.wikipedia.org/wiki/...Radar_Shuttle))

Cualquier proyecto que necesite el conocimiento de la topografía o relieve del terreno se vera beneficiado por esta información, como: la planificación de cuencas hidrográficas, estudios relacionados con conservación de suelos, hundimientos, riesgos de deslizamiento, cambios climáticos, forestación, aplicaciones militares, ubicaciones de torres de telefonía y provisión de mapas topográficos más precisos para estudios geológicos, siendo estas entre otras las aplicaciones de este modelo.

## 2.6. MODELO DIGITAL DE VARIACIÓN LATERAL DE DENSIDADES

Las anomalías de la gravedad existen solamente si las rocas componentes de la región a investigar se diferencian por su densidad y si los límites de las rocas de distinta densidad no son horizontales (Mironov V., 1977).

Los datos sobre la densidad de las rocas de la región que se estudia son necesarios para fundamentar y realizar correctamente los trabajos gravimétricos, ya que estos permiten valorar el orden de las anomalías esperadas.

Según Haberstock E. (1985), es obvio que las inexactitudes de los valores de densidad utilizados pueden conducir a imprecisiones en las correcciones gravimétricas. Ej. La corrección del plato de Bouguer (lámina de Bouguer) para una estación a una altitud de 2000 m (con referencia al nivel medio del mar) es de -221.1 mgal para una densidad de 2.65 gr/cm<sup>3</sup>, y de -230.4 mgal para 2.75 gr/cm<sup>3</sup>.

Por lo tanto, es necesario tener un buen conocimiento de las densidades, ya que ante todo, es el parámetro significativo en la exploración gravimétrica (Haberstock E., 1985).

Se denomina densidad  $p$  de cualquier sustancia homogénea a la relación entre la masa  $m$  de la sustancia y su volumen  $V$ :

$$p = \frac{m}{V}$$

(2.46)

La densidad  $p$  de las rocas depende de su composición química-mineralógica, de la porosidad y de la humedad, etc. Los procesos geológicos, influyen también en uno y otro grado en la composición y estructura del esqueleto mineral de la roca, de su porosidad y humedad.

Por ello, el estudio de la densidad de las rocas es de interés no solo de la gravimetría o de la geología, sino también para la evaluación de las alturas ortométricas, valores de densidad que pueden ser estimados a partir de mapas geológicos (Vanicek, et al., 2004) y que estas dan una aproximación razonable de la distribución topográfica actual.

El intervalo de densidades posibles según Haberstock E., 1985 va desde un mínimo de 1 gr/cm<sup>3</sup> (diatomita) hasta un medio de 2,9 – 3 gr/cm<sup>3</sup> (anhidrita, dolomita, rocas ígneas básicas) y hasta máximos locales muy altos, en caso de acumulaciones de materiales pesados (5 gr/cm<sup>3</sup> para la magnetita). Al elaborar mapas gravimétricos generales se ha adoptado la magnitud de 2.67 gr/cm<sup>3</sup>, la cual, para la mayor parte del globo terráqueo es superior al valor real, este valor común caracteriza la densidad de la parte superior del estrato cristalino de la corteza terrestre. (Haberstock E., 1985).

Debido a lo anterior mencionado, se hace necesario conocer de forma aproximada un modelo de variación de densidades, el cual se conoce con el nombre de modelo digital de variación lateral de densidades “MDVLD” (Tierra A., 2003)

Se denomina *modelo digital del terreno* a una estructura numérica de datos que representa la distribución espacial de una variable cuantitativa y continua, como puede ser la temperatura, la cota, la densidad o la presión atmosférica, etc. En particular, cuando la variable a representar es la cota o altura del terreno se denomina Modelo Digital de Elevaciones o MDE. En este caso como la variable a representar es la densidad será un MDVLD. Por lo tanto, un *Modelo Digital de Variación de Densidades (MDVLD)*, es una

representación de las densidades promedio de cada columna geológica en forma de matriz. Cada elemento del MDVLD es considerado un nodo de una malla (grid) imaginaria.

---

## CAPÍTULO III

---

### METODOLOGÍA

#### 2.7. EVALUACIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

La evaluación de la información existente permite conocer el estado de la información actual requerida además de la calidad, cantidad, procedencia, etc. de la información (datos, normas, insumos, etc.) a ser procesada. Cabe destacar que los registros de datos dentro de las tablas en este informe fueron modificados en el nombre de la estación y la precisión de las coordenadas debido a los compromisos de confidencialidad de datos con el Instituto Geográfico Militar quien es el auspiciante de este proyecto de grado, pero las tablas de los resultados finales y todos los cálculos en el proceso fueron realizados con las precisiones del caso. Dentro de la realización de este proyecto se desarrollaron las siguientes evaluaciones:

- Evaluación de la red GPS del Ecuador (RGPSE)
- Evaluación de la red PSAD56 del Ecuador (RPSAD56E)

##### 2.7.1. EVALUACIÓN DE LA RED GPS DEL ECUADOR (RGPSE)

Para conocer la calidad de la información del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), se necesitaba conocer los valores de Altura Nivelada (Hn) que contenían en sus registros coordenadas geodésicas (Latitud y Longitud) en el Sistema de Referencia WGS-84 (World Geodetic System 1984) o SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para las Américas) ya que el DEM SRTM se encuentra en WGS-84. Como SIRGAS esta referido al ITRF (International Terrestrial Reference Frame), para fines prácticos son lo mismo con el WGS-84 (Merrigan J., et al., 2002; Sánchez L., 2005).

La base de datos requerida se obtuvo en cuatro etapas así:

- ❖ **Primera evaluación de la RGPSE.**- en esta evaluación se consideraron dos bases de datos (BD), la primera llamada “Elenco de Coordenadas de los Puntos Red GPS del Ecuador” (BD1), (ver la muestra de DB1 en la Tabla 3.1), la cual comprende 135 estaciones (ver ANEXO A) que fueron observadas durante los años 1994, 1996, 1998. (Reporte 73); y la segunda que contiene todas las Monografías de los puntos de Control Horizontal del Ecuador (BD2) en los Sistemas de Referencia WGS-84 y PSAD56, las cuales reposan dentro del Departamento de Geodesia del IGM. En ésta evaluación se tomó en cuenta los siguientes criterios:

**Tabla 3.1 Muestra de la BD1 Elenco de Coordenadas de los Puntos de la Red GPS del Ecuador.**

No.	DENOM <sup>1</sup>	NOMBRE <sup>1</sup>	X(m) <sup>1</sup>	Y(m) <sup>1</sup>	Z(m) <sup>1</sup>	h <sup>1</sup>
1	Rgps01	MATEO	1374895	-6227472	-117324	389
2	Rgps02	MARCOS	1102307	-6267610	-444220	1257
3	Rgps03	LUCAS	1264178	-6254722	-35535	3161
4	Rgps04	JUAN	1448387	-6211827	9592	319
5	Rgps05	HECHOS	1166953	-6251631	-506171	1722
6	Rgps06	I CORIN	1008515	-6292663	-257526	66
7	Rgps07	II CORIN	1097953	-6270611	-393308	91
8	Rgps08	GALATA	1269692	-6253630	-31605	3164
9	Rgps09	DEUTORO	1023876	-6291585	-219838	30
10	Rgps10	ESDRAS	1447002	-6211591	-80728	282
11	Rgps11	NEHEMI	1395211	-6223513	-80221	358

<sup>1</sup> Significa que los datos de los registros fueron modificados en el nombre y en la precisión de los datos, pero en los cálculos se utilizaron los datos con toda la precisión.

X Y Z = Coordenadas cartesianas geocéntricas

h = altura elipsoidal

Sistema de Referencia: WGS 84, SIRGAS

EPOCH (Época de Referencia): 1995,4

Fuente: Datos del IGM; Recopilación: Eduardo Kirby.

- Revisión de las dos bases de datos considerando como criterios de evaluación que las dos BD tengan el mismo nombre de las 135 estaciones que las identifica como correctos,
- igual altura elipsoidal (h),
- estado del punto (buen estado, destruido, mantenimiento, etc.),
- existencia del punto en la base de datos BD2,
- diferente nombre en las dos BD pero que tienen igual valor en la altura elipsoidal,
- igual nombre pero diferente valor en la altura elipsoidal,
- diferente nombre y valor de altura elipsoidal en las dos BD,
- estaciones con nombre repetidas.
- No se tomaron en cuenta los valores de las coordenadas (cartesianas geocéntricas, geográficas o planas) en ésta revisión. Se puede ver en la tabla 3.2 una muestra de la BD2:

**Tabla 3.2 Muestra del contenido de la BD2 Monografías de la Red GPS SIRGAS de Control Horizontal del Ecuador.**

DENOMINACION <sup>1</sup>	GRA	MI	SE <sup>1</sup>	P	GRA	MI	SEC <sup>1</sup>	M	ALTURA <sup>1</sup>	TIPO	OBSERVACIONES
MATEO	0	43	32	S	77	21	51	W	359	E	Altura Geométrica: 339m
GENESIS	1	22	3	S	79	54	31	W	56	E	Altura Nivelada Geométricamente: 37mts
JUAN	0	28	43	S	78	34	53	W	2946	T	Altura Elipsoidal: 2974m
LUCAS	0	2	12	S	78	28	49	W	3515	T	Altura Elipsoidal: 3541 mts
HECHOS	0	2	36	S	78	36	12	W	3295	T	Altura Elipsoidal: 3321 mts
ESDRAS	0	14	17	N	76	50	41	W	268	G	
NEHEMI	0	19	40	S	78	31	27	W	3128	T	Altura Elipsoidal: 3155 mts
JUAN 1	0	2	29	S	78	35	37	W	3151	T	Altura Elipsoidal: 3178 mts

<sup>1</sup> Significa que los datos de los registros fueron modificados en el nombre y en la precisión de los datos, pero en los cálculos se utilizaron los datos con toda la precisión.  
TIPO =es el tipo de altura, elipsoidal (E), geométrica (G), trigonométrica (T)  
<sup>2</sup> Existen más campos cómo Latitud (decimal degrees), el orden del punto, más observaciones, etc.  
Fuente: Datos del IGM; Recopilación: Eduardo Kirby.

Los resultados obtenidos de la evaluación 1 ver en el Capítulo 4 en Cálculos y Resultados.

❖ **Segunda Evaluación.-** Debido a que no se tomó en cuenta los valores de las coordenadas horizontales en la **primera evaluación**, se procedió a evaluar nuevamente estas dos BD con algunas modificaciones en cuanto a los criterios de evaluación de la primera vez y, principalmente, antes de evaluar las dos BD se efectuó una revisión de las coordenadas cartesianas del Reporte 73 vs. las coordenadas del Elenco de Coordenadas de los Puntos Red GPS del Ecuador (BD1), dando como resultado de ésta revisión 4 puntos con error solamente en las coordenadas cartesianas en Z (ver tabla 3.3), por tanto, se volvió a calcular las coordenadas geográficas y planas en los sistema de referencia WGS-84 y PSAD56 (con los 7 parámetros), utilizando el programa de transformación de coordenadas de un sistema de referencia a otro llamado GEOCAL (The Geographic Calculator). Para conocer el proceso de transformación de coordenadas y los parámetros de cálculo utilizados ver el ANEXO B. Los criterios de evaluación en esta segunda oportunidad en cuanto al nombre y coordenadas de las 135 estaciones fueron los siguientes:

- Igual nombre en la Base de Datos Elenco de Coordenadas de los Puntos Red GPS del Ecuador (BD1) vs. La segunda Base que contiene todas las Monografías de los puntos de Control Horizontal del Ecuador (BD2).
- Similar nombre en la BD1 y BD2.
- Nombres de estaciones que en la Base DB1 existen y que en la BD2 no existen.
- Nombres identificadores de las dos BD que se encuentran repetidos.
- Revisión urgente de los nombres de la BD1 por su importancia y la no concordancia con los BD2.
- Coordenadas correctas en latitud, longitud y altura elipsoidal (h) en las dos BD, aunque el nombre sea igual o diferente.
- Coordenadas diferentes en un decimal, ya sea en la latitud, longitud o altura elipsoidal (h).
- Coordenadas diferentes en más de un decimal ya sea en la latitud, longitud, h.
- Coordenadas totalmente diferentes en las dos BD.
- No hay coordenadas en la BD2, respecto a las que si hay en la BD1.

Los resultados obtenidos de la evaluación 2 ver en el Capítulo 4 en Cálculos y Resultados.

<b>Tabla 3.3 Resultados de la Revisión de las coordenadas cartesianas Z del Reporte 73 vs. La BD2 Elenco de Coordenadas de los puntos Red GPS del Ecuador.</b>		
<b>Coordenadas Cartesianas Geocéntricas Z diferentes R73 vs. DB1</b>		
<b>NOMBRE ESTACIÓN</b>	<b>Z (m)error BD1</b>	<b>Z (m) correcto Reporte 73</b>
CUERRORZ	-43087.3910	43087.3910
LIERRORZ	-96232.3930	96232.3930
LUMERRORZ	-923.0610	923.0610
MUERRORZ	-66841.7090	66841.7090

**Recopilación: Eduardo Kirby.**

- ❖ **Tercera evaluación.-** Luego de la segunda evaluación, la actualización y corrección de algunas inconsistencias en las dos bases de datos, se procedió a clasificar las estaciones de las mismas (puntos de la RGPSE) que contienen Altura Nivelada Geométricamente y Trigonométricamente; los resultados de esta evaluación se los puede ver en *Cálculos y Resultados del Capítulo 4*.
- ❖ **Cuarta evaluación.-** Antes de la cuarta evaluación de la RGPSE, se realizó la primera y segunda evaluación del modelo digital de elevaciones del SRTM (*ver sección 3.2*), dando como resultado en estas evaluaciones valores estadísticos que no satisfacían los resultados esperados (*ver sección 4.3.3*); entonces se procedió a revisar los 38 puntos resultantes de la tercera evaluación de la RGPSE y se encontró que *uno* de los 38 puntos mencionados, no era fiable, ya que no se sabía si su altura era nivelada geométricamente o trigonométricamente. Por tanto, el punto que tenía ese inconveniente, fue borrado y la base de datos final de la RGPSE quedó comprendida por 37 puntos (*ver en Cálculos y Resultados del Capítulo 4*).

#### 2.7.2. EVALUACIÓN DE LA RED PSAD56 DEL ECUADOR (RPSAD56E)

La evaluación de la RPSAD56E se la hizo con el fin de tener más puntos de evaluación del DEM SRTM, la cual se la alcanzó en dos etapas; en la primera se seleccionaron todos los puntos útiles escogidos con ciertos criterios, luego los puntos fueron depurados y transformados a WGS-84 para su posterior utilización en la evaluación del SRTM. En la segunda etapa, se procedió a realizar una evaluación más exhaustiva de los puntos resultantes de la primera evaluación, ya que algunos de estos causaban estadísticas y productos no esperados y se necesitaba saber la causa de estas inconsistencias y resolver los problemas.

Vale la pena mencionar que los puntos de la base de datos que contiene todas las Monografías de los puntos de Control Horizontal y Vertical del Ecuador (BD2) en el Sistema de Referencia PSAD56, no están todos actualizados, ya que el Departamento de Geodesia del IGM no ha hecho posicionamiento actualizado y replanteo en ellos, porque estos puntos PSAD56 corresponden a una Red vieja y ahora se trabaja con los de la RGPSE (Información proporcionada por el personal del Departamento de Geodesia).

Los Criterios tomados en cuenta en la *primera etapa* fueron los siguientes:

- ❖ Todos los puntos que tenían coordenadas.

- ❖ Todos los puntos que tenían Altura Hn ya sea Geométricamente (G) o Trigonométricamente (T).
- ❖ Todos los puntos que estaban en el Ecuador Continental, descartando los puntos de las Islas Galápagos.

Para tener una idea de cómo es la Base de datos que contiene los puntos PSAD56 ver la *Tabla 3.4* que contiene una muestra de la Base de Datos original, con la respectiva confidencialidad de los datos.

**Tabla 3.4 Muestra del contenido de la BD2 Monografías de la Red PSAD56 de Control Horizontal del Ecuador.**

PUNTOS <sup>1</sup>	PROYECTO <sup>1</sup>	DENOMIN <sup>1</sup>	LATITUD <sup>1</sup>	LONGITUD <sup>1</sup>	ALTURA <sup>1</sup>	ALT_T <sup>1</sup>
PSAD56	proyec001	Génesis	S 1 38 09.7259	W 78 41 53.8784	2983.658	G
PSAD56	proyec002	Éxodo	S 2 13 20.4969	W 80 54 51.0506	20.246	G
PSAD56	proyec003	Levítico	S 0 24 33.3777	W 78 18 41.8966	3824.190	T
PSAD56	proyec004	Números	S 2 43 51.9782	W 79 59 55.1292		
PSAD56	proyec005	Deuteronomio	S 2 43 34.1195	W 80 03 33.6940		
PSAD56	proyec006	Josué	S 2 40 34.7497	W 80 02 25.4912		
PSAD56	proyec007	Jueces	S 2 41 22.5374	W 80 01 51.0335		
PSAD56	proyec008	Rut	S 2 42 08.9120	W 80 03 44.1249		
PSAD56	proyec009	1 Samuel	S 2 41 59.7233	W 80 03 48.8546		
PSAD56	proyec010	2 Samuel	S 2 44 17.7939	W 80 03 27.9202		
PSAD56	proyec011	1 Reyes	S 2 45 54.4147	W 80 01 25.4818		

<sup>1</sup> Significa que los datos de los registros fueron modificados en los nombres y en la precisión de los datos, pero en los cálculos se utilizaron los datos con toda la precisión.

Dentro de la Base original existen campos como: puntos sistema referencia, proyecto, denominación, provincia, cantón, parroquia, sitio, orden, tipo, latitud, longitud, norte, este, zona17, norte18, este18, zona18, altura, alt\_tipo (tipo de altura), campo0, etc.

Fuente: Datos del IGM; Recopilación: Eduardo Kirby.

Para conocer los Resultados obtenidos de la *primera etapa* de evaluación de RPSAD56E ver en *Cálculos y Resultados del capítulo 4*.

Luego de evaluar la información en la primera etapa se procedió a transformar los datos de PSAD56 a WGS-84 utilizando el programa GEOCALC con los 7 Parámetros (ver el ANEXO B).

- ❖ **Segunda etapa** de evaluación de la RPSAD56E.- Previo a la segunda etapa de evaluación, se realizó la primera y segunda evaluación del modelo digital de elevaciones del SRTM (ver sección 3.2) dando como resultado de esta evaluación valores estadísticos que no satisfacían los resultados esperados (ver sección 4.3.3). Debido a esos resultados, se decidió volver a evaluar la RPSAD56E, solamente 2729 puntos ya que 52 fueron eliminados de los 2781 por encontrarse espacialmente dentro de áreas con gaps (no hay datos). Finalmente, se tomó en cuenta los criterios de la primera etapa de evaluación y además se aumentaron otros criterios como:

- Identificar los puntos que tenían de diferencia de altura +/- 50m en la segunda evaluación del SRTM.



- Revisión de las coordenadas de los puntos y valor de Hn con las monografías de los proyectos realizados por el IGM.
- Identificar los puntos que caían en el mar o en algún otro cuerpo de agua.
- Revisión del valor de altura obtenido a través del SRTM, para comparar esta altura con la del Hn de la RPSAD56E.
- Plotear los puntos que causan error con sus respectivas coordenadas, verificarlos y compararlos con la ayuda de cartas topográficas 1:50.000 y 1:25.000 respectivamente.

Para llevar a cabo esta revisión de la segunda etapa de evaluación, se utilizaron los programas ArcView 3.2 y ArcGIS 9.x; los puntos con error fueron revisados y comparados con las monografías de cada punto. Estas monografías reposan dentro de los archivos de los proyectos que realizó el Departamento de Geodesia dentro de la Red PSAD56. Luego los puntos fueron ploteados, comparados e identificados en las cartas topográficas con el mismo sistema de referencia (las cartas utilizadas fueron proporcionadas por el IGM); finalmente, se encontraron errores los mismos que luego fueron corregidos considerando que, si no se encontraba la monografía, no se consideraba el punto y posteriormente se lo eliminaba (no había certeza de las coordenadas y Hn). Los resultados de esta segunda etapa de evaluación se aprecian en el *Capítulo 4*.

## 2.8. EVALUACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM “Digital Elevation Model”) DEL SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION)

Uno de los objetivos de evaluar el SRTM es sin duda conocer si este modelo digital de elevaciones sirve o se asemeja a escala 1:50.000, conocer el nivel de confianza de la muestra de puntos para evaluar el SRTM, calcular la diferencia y el error entre la altura del SRTM y los datos que se tienen de Altura Nivelada Geométricamente y Trigonométricamente de la RGPSE y de la RPSAD56E, identificar y conocer cuantos gaps o holes (huecos en el DEM, es decir ausencia de información, datos vacíos, asignados con valor -32767 en este DEM) existen del SRTM en el área continental ecuatoriana y finalmente, luego de evaluar el SRTM, utilizar este modelo para el cálculo de la Corrección del Terreno y cumplir con el objetivo principal de este proyecto de grado, calcular las Anomalías de Bouguer Completa.

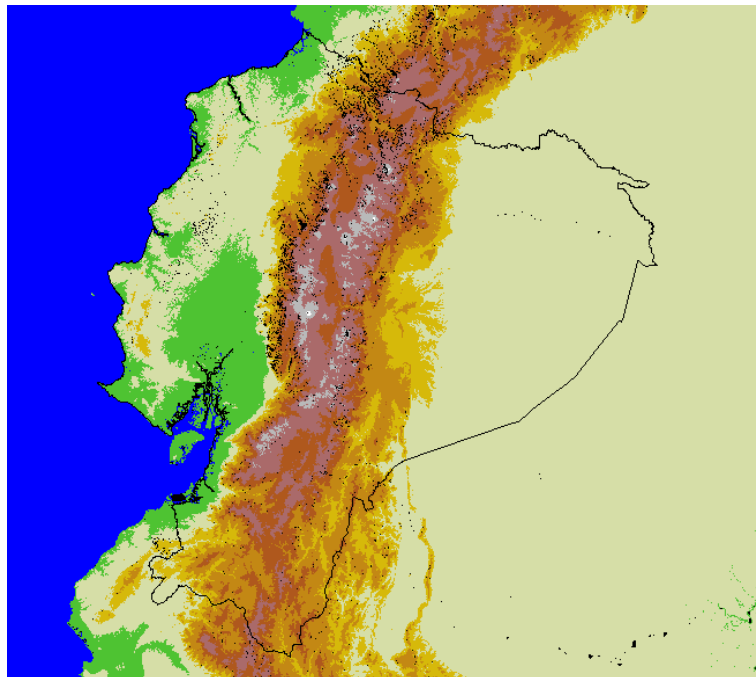
Se realizaron tres evaluaciones del SRTM las cuales se describen a continuación:

- ❖ En la *primera evaluación*, así como en las siguientes evaluaciones se consideraron los siguientes criterios:
  - Evaluar la altura del SRTM en la parte correspondiente al Ecuador Continental, (*ver figura 3.1*) sin tomar en cuenta la Región Insular de Galápagos y las Islas Puná e Isla Santay, (las cuales no influenciaban dentro del área de Estudio del proyecto de grado).
  - Evaluar la altura del SRTM en la parte correspondiente al Ecuador Continental, sin tomar en consideración las zonas que contienen gaps (*ver figura 3.2 y 3.3*)
  - Para poder realizar esta evaluación se necesita comparar la altura del SRTM con todos puntos que contengan coordenadas geográficas en WGS-84 y valores de altura a nivel medio del mar (Hn).

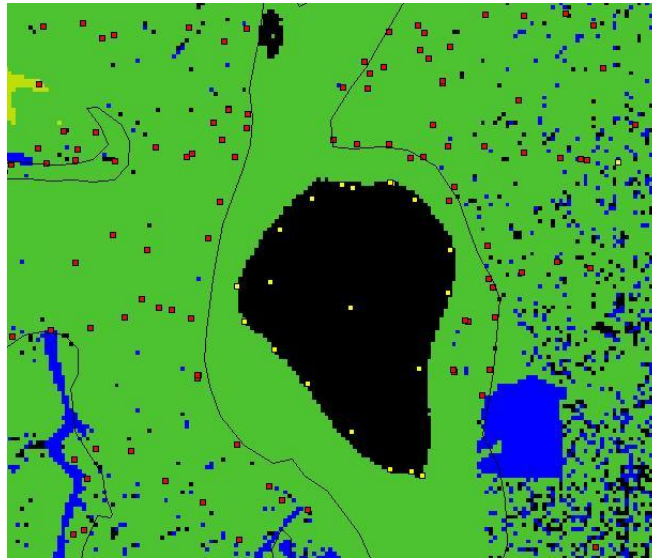
- Los valores de alturas a nivel medio del mar ( $H_n$ ), ya sea altura nivelada geoméricamente y trigonoméricamente y las coordenadas geográficas, se obtuvieron de las evaluaciones de la RGPSE y RSAD56E.

En la *primera evaluación* se utilizaron 2819 puntos, correspondientes a 2781 puntos con  $H_n$  de la RPSAD56E y los 38 de RGPSE, y un SRTM de fácil adquisición (no tiene fuente alguna), compuesto por porciones de  $5^\circ \times 5^\circ$  desde los  $0^\circ$ - $10^\circ$  Sur y  $0^\circ$ -  $15^\circ$  Norte de toda Sudamérica y parte de Centro América. Dentro de esta primera evaluación se realizó todo el proceso que se puede encontrar en el *ANEXO D*, pero no se darán a conocer sus resultados, ya que esta primera evaluación no vale, porque el SRTM que se utilizó, no tenía sistema referencia (WGS-84), y por tanto los cálculos realizados no valen. Éste problema grave suscitado, que no fue tomado en cuenta dentro de los imprevistos del proyecto, retrasó la realización de la evaluación del SRTM y por ende del proyecto de grado, pero sirvió para saber cómo y que metodología aplicar en la evaluación. Para apalejar el inconveniente se decidió adquirir el SRTM por vía Internet contactándose con página Web del USGS (United States Geological Survey) Center for Earth Resource Observation and Science (EROS) y volver a evaluar el SRTM con los 2819 puntos.

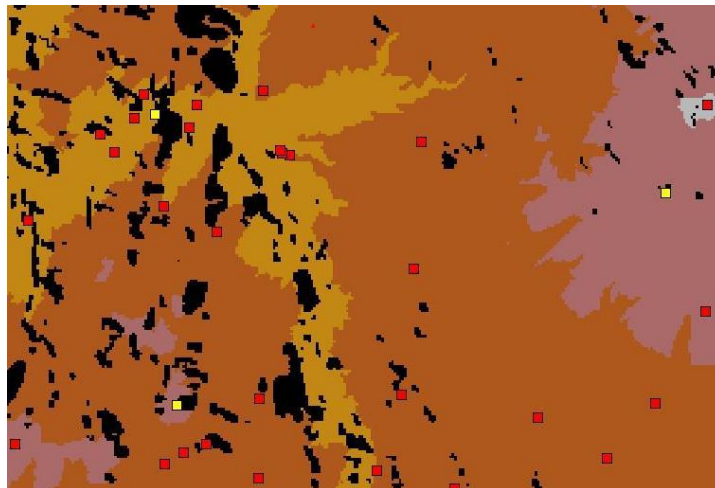
*Figura 3.1 Modelo Digital de Elevaciones del SRTM en el Ecuador*



*Figura 3.2 Isla Santay (puntos  $H_n$  en amarillo de la RPSAD56 dentro de los gaps de la Isla Santay)*



**Figura 3.3** Puntos con altura  $H_n$  (color amarillo) que coinciden espacialmente con los gaps del SRTM



- ❖ **Segunda evaluación.-** Con la llegada del CD del DEM SRTM en formato DTED, de la zona 03 que contiene al Ecuador y los 2819 puntos de las dos BD RPSAD56E y RGPSE, ver ANEXO C, se procede primeramente a calcular el número de gaps en el SRTM, luego de esto, a evaluar y calcular la diferencia de altura entre la altura del SRTM ( $z_{SRTM}$ ) y las alturas  $H_n$  de las BD. Para llevar a cabo este proceso de conocer cuantos gaps hay en el DEM correspondiente al Ecuador, calcular las diferencias de alturas y sus respectivas estadísticas se utilizaron los programas Excel, ERDAS 8.4, ArcView 3.2 y ArcGIS 9.x.; si se quiere conocer el proceso de obtención de la diferencia de alturas ver el ANEXO D.

En esta **segunda evaluación** se consideraron los mismos criterios descritos en la primera evaluación. Los cálculos y resultados de esta evaluación están publicados en el *Capítulo 4*.

**Tercera evaluación.-** Finalmente, se realizó la tercera evaluación del DEM del SRTM, para ello se utilizaron 2755 puntos correspondientes a los 2718 puntos de la segunda etapa de evaluación de la RPSAD56 y 37 puntos de la cuarta evaluación de la RGPSE

respectivamente, *ver ANEXO E*. En esta evaluación se consideraron también los mismos criterios de la primera evaluación. Los resultados se pueden encontrar en el *Capítulo 4*.

### **3.3 OBTENCIÓN DE LOS PUNTOS DE GRAVEDAD OBSERVADA (G) EN EL ÁREA DE ESTUDIO.**

El área de estudio se encuentra en las coordenadas de -1 a -2 grados en latitud y -79.5 a -78.5 grados en longitud. (*Ver Anexo F*)

Los puntos de gravedad observada son necesarios para llegar a calcular y obtener las Anomalías de Bouguer simple y completa, los mismos que fueron observados y calculados a partir de mediciones gravimétricas (utilizando el Gravímetro) realizadas por el personal del Departamento de Geodesia del Instituto Geográfico Militar (IGM) y procesadas por el mismo IGM.

Los puntos necesarios para los fines mencionados fueron obtenidos de la Base de Datos (BD) llamada “Densificación Gravimétrica del Ecuador” (DGE), los mismos que debían tener como requisitos:

- ❖ Coordenadas geodésicas en grados decimales (latitud y longitud) referidas al WGS-84.
- ❖ Valores de gravedad observada densificados a partir de la Red Gravimétrica de Ecuador.
- ❖ Valor de altura nivelada geoméricamente ( $H_n$ ).

El total de puntos que fue entregado es 1639 puntos. Estos puntos fueron revisados estipulándose los requisitos mencionados y descartando aquellos puntos que no los cumplían. También existen puntos que a más de cumplir con algunos de los requisitos fueron eliminados por tener altura nivelada Trigonométricamente, por tener fallos en el proceso de obtención o porque al momento de realizar las observaciones gravimétricas de ese punto existía influencia sísmica. Por Ej. puntos tomados en la línea Riobamba-Baños.

Finalmente, luego de la revisión y evaluación de los puntos se seleccionaron del total de registros de la BD Densificación Gravimétrica del Ecuador, *158 puntos* que influyen en el área de estudio. (*Ver los puntos en el anexo G y los resultados en el Capítulo 4*)

### **3.4 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE.**

Para completar la reducción de Bouguer (sección 2.3.3.1) y calcular las Anomalías de Bouguer, es necesario aplicar las anomalías de aire libre ( $\Delta g_{AL}$ ) (sección 2.3.2).

Para calcular las anomalías de aire libre se necesita conocer los valores de altura nivelada  $H_n$ , valores de gravedad observada, los mismos que fueron obtenidos de los 158 puntos analizados en la sección 3.3., y valores de gravedad normal para cada punto dentro del área de estudio. El proceso empleado fue el siguiente:

- En el cálculo de la corrección de aire libre ( $C_{AL}$ ) se aplicaron las ecuaciones 2.26 y 2.29.
- Para obtener los valores de gravedad normal ( $\gamma$ ) se aplicaron las ecuaciones 2.18 y 2.19.

- Finalmente, para el cálculo de las Anomalías de Aire Libre se empleo la fórmula 2.24.

Los cálculos y resultados de las anomalías de aire libre, se los puede encontrar en el capítulo 4.

### **3.5 OBTENCIÓN DE LOS VALORES DE DENSIDAD EN EL ÁREA DE ESTUDIO A PARTIR DE UN MODELO DIGITAL DE VARIACIÓN LATERAL DE DENSIDADES (MDVLD)**

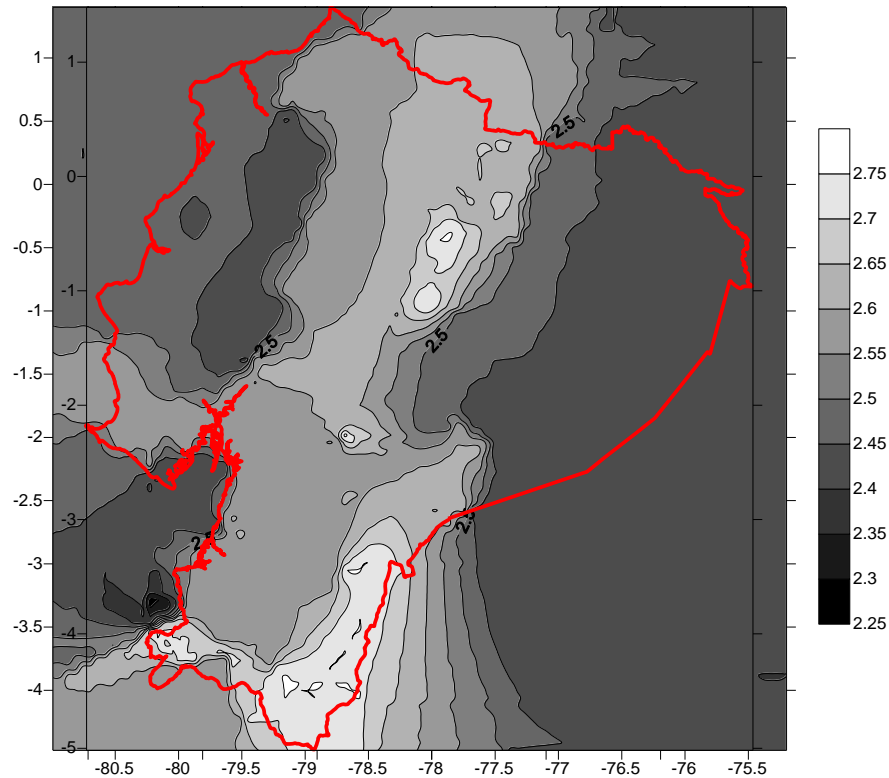
Generalmente, la Corrección de Bouguer se ha obtenido con una densidad media igual a  $2.67\text{gr/cm}^3$ . Mas, existe una densidad que puede llegar al 20% (Tierra A., 2001), especialmente en las regiones montañosas. Según Mironov (1977) al calcular las anomalías de Bouguer es de suma importancia considerar la densidad de la capa intermedia. Como el objetivo es aumentar la precisión de las Anomalías de Bouguer, se hace indispensable considerar esta variación, la misma que puede ser obtenida a partir de información geológica, geofísica u otras fuentes.

Los valores de densidad media de una columna geológica para cada punto perteneciente al área de estudio fueron obtenidos a partir de un modelo digital de variación lateral de densidades. Este modelo fue estudiado y calculado por el Dr. Alfonso Tierra en el año 2003 para el caso del Ecuador continental. (*Ver figura 3.4*).

El MDVLD para el caso del Ecuador fue obtenido (Tierra A., 2003) utilizando los siguientes criterios:

- La geología en el Ecuador es muy variada y básicamente está constituida por cinco regiones (Paladines., 1996; en Tierra A., 2003):
  - la región baja en el litoral;
  - la cordillera occidental;
  - el valle central;
  - la cordillera real;
  - y la región baja amazónica
- Los valores de densidades de las diferentes capas geológicas en la región baja del Litoral y Amazonía, fueron obtenidos a partir de los datos de: perforaciones realizadas para los estudios petroleros en el Ecuador (MEM., 2001; en Tierra A., 2003) y mediante la aplicación de la ecuación 2.35 de la sección 2.3.3.1.

***Figura 3.4 Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD) en el Ecuador Continental.***



Fuente: Tierra A., 2003

- Para las otras regiones, las densidades de las capas geológicas fueron estimadas a partir de un mapa geológico (*ver figura 3.5*), mediante una realización aproximada de perfiles geológicos, debido a la falta de conocimiento exacto de la forma y diseño de la estructura geológica por la carencia de estudios geofísicos (*ver figura 3.6*) y también, a partir del conocimiento aproximado de la composición de los minerales de las rocas, basados según Tierra (2003), en estudios de Mosquera (1980), Hurlbut (1984), mediante la aplicación de la ecuación 2.35.
- A partir de esta metodología se determinaron en estas regiones valores medios de densidad.
- Los valores medios de densidades obtenidos en la región continental del Ecuador varían (Tierra A., 2003) en un rango de  $2.42 \text{ gr/cm}^3$  a  $2.75 \text{ gr/cm}^3$ , es decir, una variación de  $0.33 \text{ gr/cm}^3$ .

Según Bajracharya (2002) (en Tierra A., 2003), que hizo un estudio utilizando variación de densidades laterales en el cálculo de la corrección del terreno. Los resultados que se obtuvieron en ese estudio, mostraron que la diferencia obtenida en la ondulación geoidal puede llegar a ser de 10 cm. Además Bajracharya sugiere, que se use una densidad media en el área de estudio para la corrección del terreno, especialmente en áreas de grandes montañas.

**Figura 3.5 Mapa Geológico del Ecuador**



Fuente: Tierra A., 2003

Es así que utilizando la información del MDVLD para el caso del Ecuador Continental, se obtuvieron los valores de densidad media para cada uno de los 158 puntos que intervienen en el área de estudio de este proyecto de grado; y de esta manera, con estos valores de densidad poder calcular la Corrección del Terreno, las Anomalías de Bouguer Simple y Completa, respectivamente. Los resultados de los valores de densidad para los 158 puntos, ver en el capítulo 4.

*Figura 3.6 Perfil Geológico Lateral*



Fuente: Tierra A., 2003

### **3.6 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER SIMPLE.**

El cálculo de las anomalías de Bouguer Simple en el área de estudio, se realizó en dos formas:

- Utilizando una densidad media igual a  $2.67 \text{ gr/cm}^3$ .

- b) Utilizando para cada punto perteneciente al área de estudio, una densidad obtenida a partir del Modelo de Variación Lateral de Densidades (MDVLD), aplicando la metodología de la sección 3.5.

Para realizar cálculos de las Anomalías de Bouguer Simple, se necesitaron como requisitos:

- Cálculo de las Anomalías de Aire Libre, aplicando la metodología de la sección 3.4.
- Cálculo del Plato de Bouguer (lámina de Bouguer), utilizando los conocimientos descritos en la sección 2.3.1.1

Para la obtención del Plato de Bouguer se utilizó, primeramente, una densidad media constante igual a  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  y luego se la realizó con una densidad en cada punto a través del MDVLD.

Los resultados de las Anomalías de Bouguer Simple para los 158 puntos pertenecientes al área de estudio, utilizando una densidad media constante o a partir de las densidades del MDVLD, se los puede ver en el capítulo 4.

Los valores de las Anomalías de Bouguer Simple, están en unidades miligales (mgal).

### 3.7 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LA CORRECCIÓN DEL TERRENO.

Para obtener las Anomalías de Bouguer completa, es necesario calcular la Corrección del Terreno, como se mencionó en la sección 2.3.3.2

Según Forsberg R. (1994) (Tierra A., 2001), la corrección del término  $B$  (Curvatura Terrestre) puede ser evitada, cuando se calcula la Corrección del Terreno mediante la integración numérica por prismas. En coordenadas cartesianas esta corrección es dada por (2.37), igual a:

$$C_T = G \iint_{\tau} \int_{z=Hn_{(P)}}^{z=Hn} \frac{\bar{\rho} (z - Hn_{(P)})}{[(x_p - x)^2 + (y_p - y)^2 + (Hn_{(P)} - z)^2]^{3/2}} dx dy dz$$

Donde:

$\tau$  indica el área de integración;

$Hn_{(P)}$  es la altura del punto  $P$  en donde se realizará el cálculo de  $C_T$ ;

$Hn$  es la altura del punto móvil (punto que se traslada a lo largo del área de integración  $\tau$ );

$x, y, z$  son las coordenadas del punto móvil;

$x_p, y_p$  son las coordenadas del punto  $P$ .

Este término  $C_T$ , es una integral auxiliar que calcula las irregularidades topográficas que están encima del Plato de Bouguer para un punto  $P$ .



La Corrección del Terreno es una cantidad importante y muy dependiente de la topografía en los ambientes inmediatos de un punto de gravedad  $P$ . Por tanto, es necesario para realizar los cálculos exactos de la  $C_T$  en áreas montañosas de Modelos Digitales de Elevaciones (DEM) de alta resolución. Si la resolución de los DEMs es baja (insuficiente), se tendrán  $C_T$  con resultados muy bajos (Sansó F., et al., 1994).

La metodología utilizada para el cálculo de la Corrección del Terreno, es la descrita por Forsberg R. (1994) (Sansó F., et al., 1994) aplicando la integración numérica por prismas.

El prisma rectangular en la ecuación (2.37) cuya densidad es constante, es un bloque rectangular útil para las integraciones numéricas de los efectos básicos del terreno.

Para calcular los efectos básicos del terreno y resolver la ecuación 2.37, Forsberg R. (1994) (en Sansó F., et al., 1994) diseñó un programa llamado "TC" (Topography Correction), el cual fue utilizado para obtener la  $C_T$  para cada uno de los 158 puntos, correspondientes al área de estudio.

El programa TC calcula las cantidades de los efectos del terreno inmersos en el campo de gravedad, cómo por ejemplo:

- El efecto topográfico directo de todas las masas sobre el nivel del mar, para una densidad constante;
- Reducción Topográfica/Isostática;
- Corrección del Terreno respecto a las irregularidades topográficas encima del Plato de Bouguer;
- Efectos de las irregularidades topográficas para una superficie mala.

Además, el programa computa, perturbaciones de la gravedad, desviación de la vertical y ondulaciones geoidales; en unidades miligales (mgal), arcos de segundo (arcsec) y metros (m), respectivamente.

Para realizar los cálculos de la  $C_T$  en el programa TC, según Forsberg R. (1994) (en Sansó F., et al, 1994), se necesita como requisito de dos Modelos Digitales de Elevaciones (DEM), el primer DEM debe tener una grilla bien densa, de por lo menos el doble de resolución que el segundo DEM (grilla menos densa). Es opcional si se quiere calcular los efectos del terreno residuales de un tercer DEM (DEM de referencia), con una grilla de menor densidad que del segundo DEM (baja resolución).

Para poder conseguir los tres DEMs, se utilizó el DEM del SRTM, pero como se dijo anteriormente, éste tiene áreas sin datos (gaps o holes), por tal razón y para los fines descritos se procedió a interpolar el SRTM para poder remendar (parchar) las áreas sin datos, de la siguiente manera:

Primeramente, para un área menor a los 10 segundos x 10 segundos, se utilizó el programa TNTmips que contiene un Script llamado "SRTMFILLscript" generado por MicroImages, cuyo objetivo es llenar los valores sin datos o agujeros del DEM del SRTM.

Este parche puede utilizarse para las áreas sin datos con cualquier DEM local disponible, por ej., el DEM a escala 1:50.000 del Ecuador Continental o en el peor de los

casos el DEM GTOPO30, disponible a nivel mundial y de libre acceso a través de Internet (una solución que más buena que nada) (<http://www.microimages.com/freestuf/scripts.htm>)

En segundo lugar, para completar el resto de las áreas sin datos (píxeles vacíos) se utilizó el método de interpolación Distance Weight (distancia ponderada) del programa ERDAS 8.4, este método utiliza una función de pesos y un juego de puntos de datos de referencia dentro de un área de interés llamada AOI.

Los valores de todos los puntos de referencia que están dentro del AOI, son pesados con un valor correspondiente a la distancia entre cada punto y el píxel a ser interpolado. (ERDAS 8.4, 2006)

Finalmente, con el DEM del SRTM parchado (*ver anexo H*), se continuó con el proceso de obtener los tres DEMs de diferente resolución, para poder obtener estos modelos se utilizó el Programa SELECTE, también diseñado por Forsberg (*ver anexo I*).

La integración de los efectos del terreno que utiliza el programa TC, es aplicando la ecuación 2.37

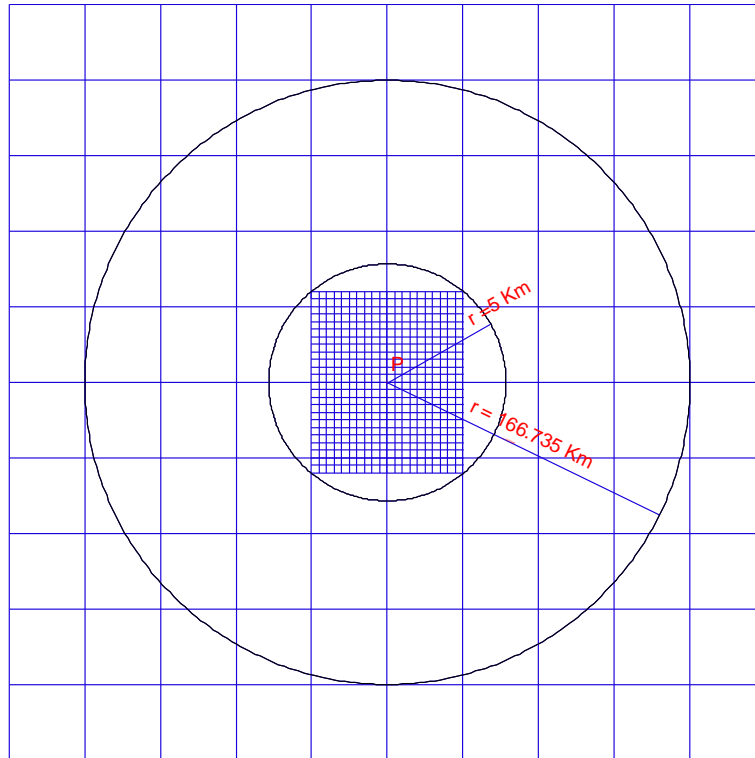
Para el cálculo de la Corrección del Terreno de un punto dado de estudio, según Forsberg R. (1994) (en Sansó F., et al, 1994), se puede arreglar en el programa, poniendo una distancia fija de análisis o todas las masas alrededor de un área dada.

Las áreas de influencia de los efectos del terreno para un punto P (*ver figura 3.7*), tienen un radio para el DEM de grilla densa de 5 Km (Tierra A., 2003) y de 166.735 Km (Heiskanen W. & Moritz H., 1967), para el DEM de menor resolución (grilla menos densa).

El programa puede utilizar un DEM en coordenadas planas o geodésicas, si se usan coordenadas planas todas las coordenadas de la grilla del DEM deben estar en la misma zona UTM.

Las alturas desconocidas en los archivos de datos de los puntos, pueden ser señalizadas por el programa con un valor de 9999. El programa no computa los datos designados con el valor de 9999 (alturas desconocidas). Sin embargo, una grilla de referencia no debe contener valores de altura desconocidos, si se quiere tener buenos resultados.

***Figura 3.7 Radios de las áreas de influencia en la Corrección del Terreno***



Fuente: Sansó F., et al, 1994; modificado por Kirby E.

Si los DEMs utilizados en el programa TC no cubren las áreas de cómputo definidas por los radios anteriormente descritos, el valor de 9999 es supuesto por el programa.

Finalmente, el programa no computa estaciones de gravedad que se encuentran en zonas de altura desconocida (9999), para no afectar en el rendimiento del programa.

La utilización del programa TC para la Corrección del Terreno, se puede ver en el Anexo J. Los resultados de la  $C_T$  para los 158 puntos del área de estudio utilizando una densidad constante obtenida a partir del MDVLD, se los puede ver en el capítulo 4.

### 3.8 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER COMPLETA.

Con la información mencionada en la sección 2.3.3.2 y aplicando la ecuación 2.38 del capítulo 2, se procedió a calcular las Anomalías de Bouguer completa.

Para el cálculo de las Anomalías de Bouguer completa en el área de estudio, se necesitó:

- Calcular las Anomalías de Aire libre;
- Calcular el Plato de Bouguer para cada punto de estudio con densidades obtenidas a partir del Modelo de Variación Lateral de Densidades;
- Calcular la Corrección del Terreno, aplicando la metodología descrita por Forsberg R. (1994).

La metodología de cálculo para las anomalías de aire libre, esta mencionada en la sección 3.4 y los resultados de estas anomalías están en el capítulo 4.

Para calcular el Plato de Bouguer, se utilizó la información y las fórmulas de la sección 2.3.3.1; los valores de densidad utilizados para el cálculo de cada punto en el Plato de Bouguer, fueron obtenidos a partir de un Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD), la metodología utilizada en este modelo, se la puede encontrar en la sección 3.5 de este mismo capítulo, los resultados del MDVLD están escritos en el capítulo 4.

Para el cálculo de la Corrección del Terreno, se utilizó la metodología de estudio (sección 3.7) y el programa TC (Topography Correction) diseñado por Forsberg R. (1994) (en 3.7 y Anexo J), con la ayuda del Modelo Digital de Elevaciones (DEM) SRTM (Shuttle Radar Topography Mission).

Aplicando la ecuación 2.38, se obtuvieron 158 puntos con Anomalías de Bouguer Completa, los resultados y estadísticas calculadas están en el capítulo 4.

Finalmente, con los resultados obtenidos en el capítulo 4, se elaboró un mapa de Anomalías de Bouguer Completa, *ver Capítulo 4*.

## CAPÍTULO IV

### CÁLCULOS Y RESULTADOS

#### 2.9. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA RED GPS DEL ECUADOR (RGPSE).

##### 2.9.1. RESULTADOS DE LA PRIMERA EVALUACIÓN DE LA RGPSE

Los resultados obtenidos de la primera evaluación se los puede ver en la *Tabla 4.1*

<b>Tabla 4.1 Resultados de la Primera Evaluación de la Red GPS del Ecuador</b>	
<b>DB1 vs. DB2</b>	
<b>CRITERIO</b>	<b>CANTIDAD</b>
Altura elipsoidal (h) y Nombre igual en las dos BD	76

No existencia del punto en la BD2	38
Diferente nombre del punto con igual valor de h en las dos BD	5
Igual nombre, diferente valor de Altura h	10
Diferente nombre y valor de Altura h en las dos BD	5
Nombre repetido en la BD1	1
<b>TOTAL DB1</b>	<b>135</b>
Estado del Punto	
Buen Estado	120
Destruído	6
Mantenimiento	6
Red DMQ	3
<b>TOTAL DB1</b>	<b>135</b>
<i>Fuente: Departamento de Geodesia del IGM; recopilado por Eduardo Kirby</i>	

### 2.9.2. RESULTADOS DE LA SEGUNDA EVALUACIÓN DE LA RGPSE

Para obtener los resultados de la *segunda evaluación*, primeramente se procedió a evaluar la BD1 (Elenco de Coordenadas de los Puntos Red GPS del Ecuador) vs. Reporte 73, obteniéndose como resultado 4 puntos con error solamente en la coordenada cartesiana Z, ver *Tabla 3.3 del Capítulo 3*. Al dar como resultado estos 4 errores se procede a volver a calcular las coordenadas de la BD1. Finalmente, ya transformadas las coordenadas, corregidas y actualizadas se obtiene como resultado de la segunda evaluación la *Tabla 4.2*

<b>Tabla 4.2 Resultados de la Segunda Evaluación de la Red GPS del Ecuador</b>	
<b>DB1 vs. DB2</b>	
<b>CRITERIO</b>	<b>CANTIDAD</b>
Igual nombre en la BD1 vs. BD2.	83
Similar nombre en la BD1 y BD2.	10
Nombres de estaciones que en la Base DB1 existen y que en la BD2 no existen.	36
Nombres identificadores de las dos BD que se encuentran repetidos.	2
Revisión urgente de los nombres de la BD1 por su importancia y la no concordancia con los BD2.	4
<b>TOTAL de estaciones revisadas en cuanto al nombre</b>	<b>135</b>
Coordenadas correctas en latitud, longitud y altura elipsoidal (h) en las dos BD.	57
Coordenadas diferentes en un decimal, ya sea en la latitud, longitud o altura elipsoidal (h).	27
Coordenadas diferentes en más de un decimal ya sea en la latitud, longitud, h.	5
Coordenadas totalmente diferentes en las dos BD.	3
No hay coordenadas en la BD2, respecto a las que si hay en la BD1.	7

Parcial de estaciones respecto a coordenadas	99
Total de estaciones respecto a coordenadas (parcial de estaciones 99 + 36 de nombres de estaciones que en la Base DB1 existen y que en la BD2 no existen).	135
<i>Fuente: Departamento de Geodesia del IGM; recopilado por Eduardo Kirby</i>	

### 2.9.3. RESULTADOS DE LA TERCERA EVALUACIÓN DE LA RGPSE

En la tercera evaluación de la RGPSE se obtuvieron 38 puntos que tienen Altura Hn, los cuales fueron utilizados en la evaluación del SRTM, 24 son con Altura Nivelada Geométricamente y los 14 restantes Altura Nivelada Trigonométricamente, estos puntos los podemos ver en la *Tabla 4.3*.

PROYECTO	LAT (°)	LON (°)	ALT Hn (m)	TIPO ALTURA
RED-DSIRGAS 001	-0.725	-77.364	340	G
RED-DSIRGAS 002	-1.367	-79.909	38	G
RED-DSIRGAS 003	-0.479	-78.581	2946	T
RED-DSIRGAS 004	-0.037	-78.480	3515	T
RED-DSIRGAS 005	-0.043	-78.603	3295	T
RED-DSIRGAS 006	0.238	-76.845	268	G
RED-DSIRGAS 007	-0.328	-78.524	3128	T
RED-DSIRGAS 008	-0.041	-78.594	3151	T
RED-DSIRGAS 009	0.144	-78.696	1451	T
RED-DSIRGAS 010	-1.138	-79.079	1536	G
RED-DSIRGAS 011	-0.583	-79.150	492	
RED-DSIRGAS 012	0.304	-78.046	3836	T
RED-DSIRGAS 013	0.000	-78.428	2636	T
RED-DSIRGAS 014	-0.219	-78.649	2781	T
RED-DSIRGAS 015	-0.203	-78.329	2594	G
RED-DSIRGAS 016	-0.215	-78.494	2893	G
RED-DSIRGAS 017	0.161	-78.420	2519	G
RED-DSIRGAS 018	1.210	-79.045	3	G
RED-DSIRGAS 019	0.870	-78.448	627	G
RED-DSIRGAS 020	0.162	-78.821	1686	T
RED-DSIRGAS 021	-0.250	-79.204	501	G
RED-DSIRGAS 022	0.008	-77.322	1064	T
RED-DSIRGAS 023	-0.506	-78.534	3005	G
RED-DSIRGAS 024	-0.937	-80.671	21	G
RED-DSIRGAS 025	-0.027	-78.759	1726	G
RED-DSIRGAS 026	-0.270	-78.509	3185	T
RED-DSIRGAS 027	-1.554	-80.428	121	G
RED-DSIRGAS 028	-0.381	-78.141	3134	G
RED-DSIRGAS 029	-0.381	-78.141	3134	G
RED-DSIRGAS 030	-0.420	-78.356	3248	T
RED-DSIRGAS 031	-2.411	-80.365	67	G
RED-DSIRGAS 032	-1.505	-78.064	1050	G
RED-DSIRGAS 033	-1.841	-80.223	56	G

<b>RED-DSIRGAS 034</b>	-0.326	-76.913	327	G
<b>RED-DSIRGAS 035</b>	-0.608	-78.401	3818	G
<b>RED-DSIRGAS 036</b>	-1.703	-79.039	2504	G
<b>RED-DSIRGAS 037</b>	-0.368	-78.576	3270	T
<b>RED-DSIRGAS 038</b>	-4.055	-78.932	909	G
<i>Fuente: Departamento de Geodesia del IGM, con la respectiva confidencialidad de datos Recopilado y modificado por Eduardo Kirby</i>				

#### 2.9.4. RESULTADOS DE LA CUARTA EVALUACIÓN DE LA RGPSE

Los resultados de la cuarta evaluación del SRTM, son los mismos que se encuentran en la *Tabla 4.3*, con la diferencia que el punto **RED-DSIRGAS 011** de coordenadas -0.583 en latitud, -79.15 en longitud y de altura 492, fue eliminado, ya que no se sabía exactamente el tipo de altura en ese punto. Entonces, la base de datos final de la RGPSE quedó compuesta por 37 puntos.

## 2.10. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DE LA RED PSAD56 DEL ECUADOR (RPSAD56E)

### 2.10.1. RESULTADOS DE LA PRIMERA ETAPA DE EVALUACIÓN DE LA RED PSAD56 DEL ECUADOR (RPSAD56E)

En la primera etapa se obtuvieron 2781 puntos en PSAD56, los mismos que transformados a WGS-84 se pueden utilizar para evaluar el SRTM, los cuales son el resultado de los puntos que tienen altura nivelada geoméricamente y nivelada trigonoméricamente, sin considerar con los que se tiene en las Islas Galápagos, ver *Tabla 4.4*

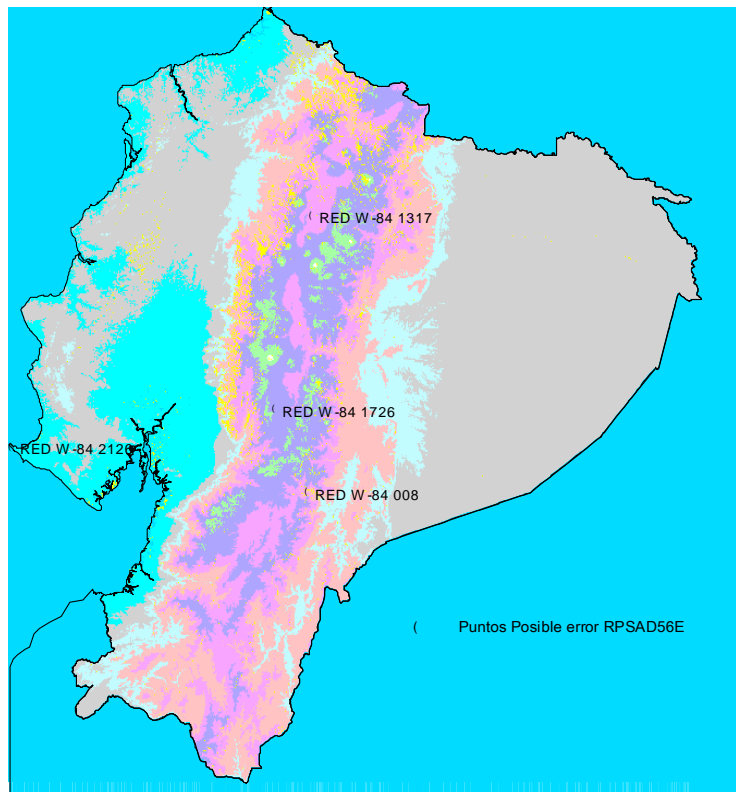
<b>Tabla 4.4 Resultados de la evaluación de la Red PSAD56 del Ecuador en la primera etapa</b>	
<b>Análisis de la Información encontrada en RPSAD56E</b>	<b>TOTAL</b>
Puntos encontradas en la Base de Datos RPSAD56E	3219
Puntos con algún Tipo de Altura	3173
Puntos con altura Ortométrica (O), Geométrica (G) y Trigonométrica (T)	2829
Puntos con altura nivelada G y T (Continental + Islas Galápagos (IA))	2794
Puntos de Altura G (con IA)	1645
Puntos de Altura T (con IA)	1149
Puntos de Altura G y T en las Islas Galápagos (IA)	13
<b>Puntos a utilizar en la Evaluación SRTM</b>	<b>2781</b>
<i>Fuente: Departamento de Geodesia del IGM; Recopilado por: Eduardo Kirby.</i>	

2.10.2. RESULTADOS DE LA SEGUNDA ETAPA DE EVALUACIÓN DE LA RED PSAD56 DEL ECUADOR (RPSAD56E)

Para obtener estos resultados, previamente se hicieron análisis y resultados en la segunda evaluación del SRTM (*ver 3.1.2 y 4.3.3*), luego de esto, se obtuvieron los resultados que se muestran en la *Tabla 4.5*

<b>Tabla 4.5 Resultados de la segunda etapa de evaluación de la RPSAD56E</b>	
<b>Observaciones</b>	<b>Total</b>
Puntos obtenidos de la primera etapa de la RPSAD56E	2781
Puntos eliminados por estar espacialmente en los Gaps del SRTM	52
Puntos revisados en la segunda etapa de la RPSAD56E	2729
Puntos con diferencia de altura de +/- 50m de la segunda evaluación SRTM	23
Puntos eliminados por tener errores y/o por no ser confiables en las monografías	10
Puntos identificados con error que fueron corregidos	9
Puntos con posible error que resultaron estar correctos (Dif_alt= -359.455; 360.078;-114.090;-68.521), <b>ver figura 4.1</b>	4
Puntos eliminados por encontrarse en alta mar	1
Puntos correctos resultado de la segunda etapa de evaluación de la RPSAD56E	<b>2718</b>
<i>Dif_alt = diferencia de altura, resultado de la resta entre las alturas obtenidas a partir del SRTM y Hn de RPSAD56E en la segunda evaluación del SRTM</i>	
<i>Recopilado por Eduardo Kirby</i>	

**Figura 4.1 Puntos sin error RPSAD56E de altura < -50m y >50m**





## 2.11. RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN DEL MODELO DIGITAL DE ELEVACIONES (DEM) DEL SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION)

### 2.11.1. RESULTADO DEL NÚMERO DE HOLES (GAPS) EN EL SRTM

<b>Tabla 4.6 Número de Holes (Gaps) en el DEM del SRTM</b>		
<b>SRTM correspondiente a todo el Ec, parte de Co y Pe</b>	<b>TOTAL (Píxeles)</b>	<b>%</b>
Columnas y filas = (10801x12001)	129 622 801	100
Píxeles con valor -32767	1 284 364	0.991
Píxeles que se encuentran en el rango de -32767 a -3	1 359 449	1.049
Píxeles que se encuentran en el rango de <b>-32766</b> a -3	75 085	0.058
<b>SRTM correspondiente a la parte continental del Ecuador</b>	<b>TOTAL (Píxeles)</b>	<b>%</b>
Columnas y filas = (6987x7800)	54 798 600	100
Píxeles con valor -32767	502 492	0.917
Píxeles que se encuentran en el rango de -32767 a -3	507 326	0.926
Píxeles que se encuentran en el rango de <b>-32766</b> a -3	4 834	0.009
<b>SRTM para el cálculo de la Corrección del Terreno (167Km)</b>	<b>TOTAL (Píxeles)</b>	<b>%</b>
Columnas y filas = (4806x4805)	23 092 830	100
Píxeles con valor -32767	387 592	1.678
Píxeles que se encuentran en el rango de -32767 a -3	392 782	1.701
Píxeles que se encuentran en el rango de <b>-32766</b> a -3	5 190	0.022
<b>SRTM del área del proyecto de grado (1° x1°)</b>	<b>TOTAL (Píxeles)</b>	<b>%</b>
Columnas y filas = (1201x1201)	1 442 401	100
Píxeles con valor -32767	89 853	6.229
Píxeles que se encuentran en el rango de -32767 a -3	89 886	6.232
Píxeles que se encuentran en el rango de <b>-32766</b> a -3	33	0.002
<i>Ec = Ecuador; Co=Colombia; Pe= Perú</i>		
<i>Gaps = Holes = huecos en el DEM, es decir ausencia de información, datos vacíos.</i>		
<i>Recopilado por Eduardo Kirby</i>		

Los resultados del número de gaps, dan a conocer que el porcentaje de gaps del total de píxeles con información en el DEM para el Ecuador alcanzan el 1% y conforme se considera la región montañosa, aumenta en el área de estudio a 6.23%.

### 2.11.2. RESULTADOS DE LA SEGUNDA EVALUACIÓN DEL DEM DEL SRTM

<b>Tabla 4.7 Resultados de la segunda evaluación del SRTM</b>			
<b>Diferencia de altura del zSRTM y Hn</b>			
<b>Observaciones</b>	<b>Total</b>		
<b>Puntos evaluados de la RSAD56E</b>	<b>2781</b>		
Puntos eliminados de la RPSAD56E (alturas zSRTM -32767 a -190)	52		
Puntos restantes de la RPSAD56E	2729		
<b>Puntos evaluados de la RGPSE</b>	<b>38</b>		
Puntos eliminados de la RGPSE (alturas zSRTM < -3)	0		
Puntos restantes de la RGPSE	38		
<b>Puntos restantes de las dos BD</b>	<b>2767</b>		
<b>Información estadística puntos restantes</b>	<b>RPSAD56E</b>	<b>RGPSE</b>	<b>BD 2767</b>
Sumatoria	-18093.83	-138.583	-18232.413
Total puntos	2729	38	2767
Media	-6.63	-3.647	-6.589

Máximo	2849.9	100.648	2849.9
Mínimo	-2801.62	-22.18	-2801.62
Rango	5651.52	122.828	5651.52
Varianza	15271.398	358.43	15066.511
Desviación Estándar	123.577	18.932	122.746
<b>BD= Base de datos</b>			
<b>2767 = total de puntos restantes de las BD RGPSE + RPSAD56E</b>			
<b>Calculado y Recopilado por Eduardo Kirby</b>			

### 2.11.3. RESULTADOS DE LA TERCERA EVALUACIÓN DEL DEM DEL SRTM

<b>Tabla 4.8 Tercera evaluación del SRTM</b>			
<b>Diferencia de altura del zSRTM y Hn</b>			<b>Total</b>
<b>Observaciones</b>			
<i>Puntos correctos resultado de la segunda etapa de evaluación de la RPSAD56E</i>			2718
<i>Puntos evaluados en la cuarta etapa de RGPSE</i>			37
<i>Puntos finales utilizados en la tercera evaluación del SRTM</i>			<b>2755</b>
<b>Información estadística puntos restantes</b>	<b>RPSAD56E (2718)</b>	<b>RGPSE (37)</b>	<b>BD 2755</b>
Total puntos	2718	37	2755
Media	-4.587	-6.466	-4.612
Media aritmética absoluta	7.776	8.008	7.779
Máximo	360.078	5.852	360.078
Mínimo	-359.455	-22.18	-359.455
Rango	719.533	28.032	719.533
Varianza	203.13	58.069	201.207
Desviación Estándar	14.252	7.62	14.185
Desviación Estándar <sup>1</sup>	12.794	5.927	12.726
<b>BD= Base de datos</b>			
<b>2755 = total de puntos finales de las BD RGPSE + RPSAD56E</b>			
<sup>1</sup> = Cálculo de la desviación estándar con los valores absolutos de la diferencia de altura entre zSRTM y Hn			
<b>Calculado y Recopilado por Eduardo Kirby</b>			

### 2.11.4. CÁLCULO DEL ERROR EN LA EVALUACIÓN DEL DEM DEL SRTM

Para el cálculo del error en la evaluación del DEM del SRTM, primeramente, se calculó el *nivel de confianza* de la muestra, a partir de la ecuación:

$$n = \frac{\sigma^2 Z^{\alpha/2}}{\tau^2} \quad (4.1)$$

En donde:

$n$  = Tamaño de la muestra, igual a 2755.

$\sigma$  = la desviación estándar, igual a 12.726m, tomando en cuenta el valor de la media aritmética absoluta.

$Z^{\alpha/2}$  = es el valor que representa el área bajo la curva de la distribución normal estandarizada y que sirve para el cálculo del nivel de confianza.

$\tau$  = es el error permitido o tolerado en el proceso, igual a 16m

Resolviendo la ecuación (4.1), se obtiene 65.99 como valor de  $Z^{\alpha/2}$ ; interpretando este valor en la tabla de la distribución normal se obtiene un valor de 3.9; lo que indica un porcentaje aproximado de 99.999.

Conociendo el valor de  $Z^{\alpha/2}$ , se puede calcular el error de la evaluación del SRTM de la siguiente manera:

$$error = |\bar{X}| \pm Z^{\alpha/2} \sigma_{\bar{x}} \quad (4.2)$$

En donde:

$|\bar{X}|$  = es el valor de la media aritmética absoluta, igual a 7.779m

$Z^{\alpha/2}$  = es el valor que representa el área bajo la curva de la distribución normal estandarizada, igual a 3.9

$\sigma_{\bar{x}}$  = es el error típico de la muestra, calculado a partir de:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\hat{\sigma}}{\sqrt{n}} \quad (4.3)$$

En donde:

$\hat{\sigma}$  = la desviación estándar, igual a 12.726m, tomando en cuenta el valor de la media aritmética absoluta.

$n$  = Tamaño de la muestra, igual a 2755.

Calculando la ecuación del *error típico* (4.3), se obtuvo un valor igual a  $\pm 0.242$ m

Finalmente, resolviendo la ecuación (4.2), se puede conocer el error probable en la evaluación del SRTM a un nivel de confianza del 99.999%, el mismo que es igual a  $7.779 \pm 0.944$ m.

#### 4.4 RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE LOS PUNTOS DE GRAVEDAD OBSERVADA DE LA BASE DE DATOS DENSIFICACIÓN GRAVIMÉTRICA DEL ECUADOR.

Tabla 4.9 Resultados de los puntos de gravedad utilizados para la obtención de las Anomalías de Bouguer	
Observaciones	Cantidad
Total de puntos analizados en la BD DGE	1639
Puntos eliminados por no tener valor de altura	8
Puntos eliminados por fallos en el procesamiento	1
Puntos eliminados por tener altura nivelada trigonométricamente	9
Puntos eliminados por tener influencia sísmica	11
Total de puntos eliminados	29
Puntos que cumplen con los requisitos de 3.3	1610
Puntos a ser utilizados en el área de estudio	158

BD= Base de Datos  
DGE= Densificación Gravimétrica del Ecuador (nombre de la BD)  
Fuente: Departamento de Geodesia del IGM; recopilado por Kirby E.

## 4.5 CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LAS ANOMALÍAS DE AIRE LIBRE

Para realizar los cálculos, se aplicaron las ecuaciones descritas en la sección 3.4, los resultados de las Anomalías de Aire Libre ( $\Delta g_{AL}$ ) deben estar en la unidad miligal (mgal), para obtener esta unidad, los valores de altura  $H_n$  empleados en el cálculo de la corrección de aire libre deben estar en metros, los valores de gravedad tanto observada, como normal, deben estar en mgal. Los resultados obtenidos ver en la tabla 4.10.

<b>TABLA 4.10 Anomalías de Aire Libre</b>									
PTO	LAT°	LONG°	Hn	CAL	$\gamma$ (mgal)	g(mgal)	$\Delta g_{AL}$ (mgal)	$\Delta g_{AL}$ (gal)	
1	-1.8	-79.4	7.8	2.395	978038	978048	12.542	0.012542	
2	-1.8	-79.3	13.5	4.156	978038	977998	-36.146	-0.036146	
3	-1.8	-79.3	113.8	35.023	978037	977955	-46.984	-0.046984	
4	-1.8	-79.2	403.1	124.033	978037	977888	-25.739	-0.025739	
5	-1.9	-79.4	12.0	3.688	978038	978021	-13.201	-0.013201	
6	-1.8	-79.3	36.7	11.293	978038	977981	-44.954	-0.044954	
7	-1.8	-79.2	306.8	94.406	978037	977911	-31.970	-0.031970	
8	-1.8	-79.2	790.6	243.248	978037	977780	-14.454	-0.014454	
9	-1.8	-79.5	6.9	2.121	978038	978054	18.788	0.018788	
10	-1.9	-79.4	10.7	3.293	978038	978033	-1.981	-0.001981	
11	-1.8	-79.3	18.8	5.791	978038	977987	-45.106	-0.045106	
12	-1.8	-79.3	172.1	52.947	978037	977939	-45.039	-0.045039	
13	-1.8	-79.4	12.3	3.784	978038	978042	8.315	0.008315	
14	-1.9	-79.4	10.6	3.268	978038	978010	-25.022	-0.025022	
15	-1.8	-79.3	54.7	16.816	978038	977973	-47.786	-0.047786	
16	-1.8	-79.2	621.1	191.096	978037	977826	-20.555	-0.020555	
17	-2.0	-78.7	3140.4	965.654	978039	977234	161.413	0.161413	
18	-1.9	-78.7	3187.7	980.185	978038	977213	155.368	0.155368	
19	-1.8	-78.7	3205.1	985.514	978038	977189	136.539	0.136539	
20	-1.7	-78.8	3212.9	987.904	978037	977189	139.951	0.139951	
21	-1.9	-78.7	3140.5	965.658	978038	977226	153.765	0.153765	
22	-1.8	-78.7	3247.0	998.394	978038	977179	140.037	0.140037	
23	-1.7	-78.8	3204.6	985.374	978037	977191	139.040	0.139040	
24	-1.7	-78.7	2902.7	892.611	978037	977268	123.408	0.123408	
25	-2.0	-78.7	3101.4	953.659	978039	977242	157.122	0.157122	
26	-1.9	-78.7	3157.8	971.001	978038	977206	139.424	0.139424	
27	-1.7	-78.8	3309.6	1017.623	978037	977166	145.930	0.145930	
28	-1.6	-78.7	3095.5	951.844	978037	977210	124.692	0.124692	
29	-1.7	-78.7	2804.0	862.267	978037	977289	114.655	0.114655	
30	-1.9	-78.7	3064.4	942.276	978038	977243	146.924	0.146924	
31	-1.8	-78.8	3305.5	1016.363	978037	977168	146.677	0.146677	
32	-1.5	-78.7	3042.4	935.532	978036	977232	131.471	0.131471	
33	-1.6	-78.7	3004.4	923.851	978037	977224	110.834	0.110834	
34	-1.5	-78.7	3495.3	1074.670	978036	977103	141.982	0.141982	
35	-1.4	-78.7	3357.0	1032.184	978036	977135	131.055	0.131055	
36	-1.4	-78.6	3189.2	980.619	978036	977173	118.264	0.118264	
37	-1.3	-78.6	2906.3	893.716	978035	977220	78.122	0.078122	
38	-1.2	-78.6	2470.2	759.669	978035	977304	28.435	0.028435	
39	-1.2	-78.6	2580.7	793.649	978035	977289	47.479	0.047479	

## IV

40	-1.1	-78.6	2673.5	822.173	978035	977263	50.280	0.050280
41	-1.6	-78.7	2907.4	894.033	978037	977263	119.932	0.119932
42	-1.5	-78.7	3330.9	1024.157	978036	977134	121.565	0.121565
43	-1.5	-78.7	3602.4	1107.577	978036	977082	153.555	0.153555
44	-1.4	-78.7	3166.4	973.616	978036	977179	116.596	0.116596
45	-1.4	-78.7	3201.3	984.338	978036	977172	120.285	0.120285
46	-1.4	-78.6	3076.9	946.144	978036	977189	100.048	0.100048
47	-1.3	-78.6	2790.8	858.207	978035	977240	62.880	0.062880
48	-1.2	-78.6	2575.9	792.171	978035	977279	35.880	0.035880
49	-1.1	-78.6	2663.7	819.138	978034	977254	38.879	0.038879
50	-1.0	-78.6	2655.1	816.494	978034	977247	29.500	0.029500
51	-1.7	-78.7	2769.2	851.580	978037	977292	106.745	0.106745
52	-1.6	-78.7	3164.8	973.129	978036	977173	109.367	0.109367
53	-1.5	-78.7	3523.6	1083.366	978036	977099	146.340	0.146340
54	-1.4	-78.7	3194.5	982.272	978036	977172	119.070	0.119070
55	-1.3	-78.6	3014.4	926.916	978035	977200	91.610	0.091610
56	-1.3	-78.6	2744.0	843.842	978035	977245	53.897	0.053897
57	-1.2	-78.6	2692.0	827.859	978035	977263	56.378	0.056378
58	-1.1	-78.6	2701.3	830.715	978034	977252	47.942	0.047942
59	-1.3	-78.7	2964.2	911.484	978035	977199	75.259	0.075259
60	-1.3	-78.7	3161.2	972.032	978035	977160	96.363	0.096363
61	-1.3	-78.8	3574.5	1099.010	978035	977080	143.668	0.143668
62	-1.3	-78.8	3717.9	1143.048	978035	977062	170.086	0.170086
63	-1.4	-78.8	4039.6	1241.866	978035	977014	220.264	0.220264
64	-1.4	-78.9	4028.1	1238.332	978036	977050	253.063	0.253063
65	-1.5	-78.9	4027.3	1238.089	978036	977027	229.345	0.229345
66	-1.5	-79.0	3492.9	1073.940	978036	977147	184.500	0.184500
67	-1.6	-79.0	2796.1	859.840	978036	977310	133.153	0.133153
68	-1.6	-79.0	2576.1	792.241	978037	977358	113.433	0.113433
69	-1.7	-79.0	2437.3	749.579	978037	977402	114.301	0.114301
70	-1.7	-79.1	2878.6	885.197	978037	977324	171.926	0.171926
71	-1.8	-79.1	2329.5	716.428	978038	977451	129.879	0.129879
72	-1.8	-79.1	2220.4	682.894	978038	977501	146.386	0.146386
73	-1.8	-79.2	1529.4	470.449	978038	977642	75.134	0.075134
74	-1.8	-79.2	225.2	69.288	978037	977741	-227.362	-0.227362
75	-1.3	-78.6	2803.8	862.205	978035	977233	60.152	0.060152
76	-1.3	-78.7	3093.4	951.198	978035	977173	89.161	0.089161
77	-1.3	-78.7	3420.5	1051.694	978035	977110	126.194	0.126194
78	-1.3	-78.8	3604.6	1108.255	978035	977080	152.513	0.152513
79	-1.3	-78.8	3799.7	1168.199	978035	977054	186.660	0.186660
80	-1.4	-78.8	4000.7	1229.923	978035	977017	211.392	0.211392
81	-1.4	-78.8	4019.7	1235.749	978036	977041	241.033	0.241033
82	-1.4	-78.9	4135.9	1271.452	978036	977011	246.583	0.246583
83	-1.5	-79.0	3674.9	1129.866	978036	977102	195.453	0.195453
84	-1.5	-79.0	3172.2	975.424	978036	977220	159.241	0.159241
85	-1.6	-79.0	2913.8	896.019	978036	977286	145.162	0.145162
86	-1.6	-79.0	2467.0	758.694	978037	977377	99.053	0.099053
87	-1.7	-79.0	2369.2	728.630	978037	977412	103.339	0.103339
88	-1.7	-79.0	2440.5	750.546	978037	977402	115.203	0.115203
89	-1.8	-79.1	2545.5	782.818	978037	977399	144.426	0.144426
90	-1.8	-79.1	2433.5	748.406	978038	977444	154.345	0.154345
91	-1.8	-79.2	1854.5	570.412	978038	977582	114.256	0.114256
92	-1.8	-79.2	1210.3	372.321	978038	977713	47.741	0.047741
93	-1.3	-78.6	2641.7	812.375	978035	977268	45.674	0.045674
94	-1.3	-78.6	2656.3	816.873	978035	977274	55.641	0.055641
95	-1.3	-78.6	2641.6	812.375	978035	977285	62.017	0.062017
96	-1.3	-78.6	2721.1	836.799	978035	977278	79.492	0.079492
97	-1.3	-78.5	2606.9	801.697	978035	977307	73.692	0.073692

## IV

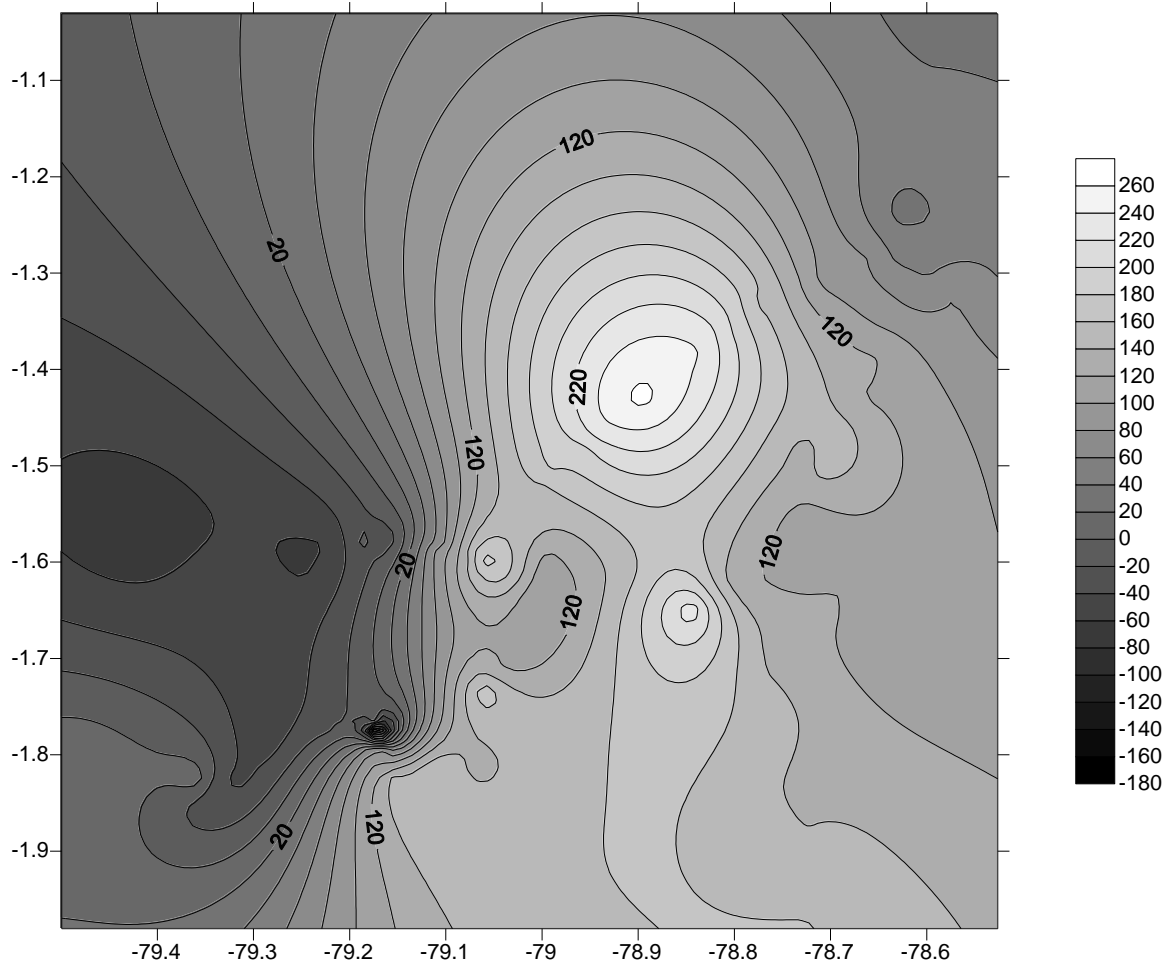
98	-1.3	-78.5	2464.3	757.875	978035	977339	61.808	0.061808
99	-1.6	-79.0	2538.9	780.807	978037	977366	110.174	0.110174
100	-1.7	-79.0	2477.2	761.839	978037	977387	112.332	0.112332
101	-1.7	-79.1	2651.8	815.487	978037	977367	144.939	0.144939
102	-1.8	-79.1	2469.5	759.473	978038	977416	137.807	0.137807
103	-1.8	-79.1	2361.5	726.267	978038	977458	146.247	0.146247
104	-1.8	-79.2	1693.8	521.017	978038	977610	93.514	0.093514
105	-1.3	-78.7	3012.6	926.362	978035	977189	80.192	0.080192
106	-1.3	-78.7	3251.6	999.811	978035	977142	106.512	0.106512
107	-1.3	-78.8	3621.5	1113.449	978035	977074	151.647	0.151647
108	-1.4	-78.8	3893.8	1197.094	978035	977035	196.235	0.196235
109	-1.4	-78.8	4080.8	1254.518	978036	977021	240.090	0.240090
110	-1.4	-78.9	4160.5	1279.015	978036	977022	265.633	0.265633
111	-1.5	-79.0	3541.6	1088.903	978036	977131	183.371	0.183371
112	-1.5	-79.0	3081.8	947.645	978036	977243	154.314	0.154314
113	-1.6	-79.0	2666.8	820.102	978037	977338	121.601	0.121601
114	-1.7	-79.0	2514.2	773.204	978037	977369	105.025	0.105025
115	-1.7	-79.1	2804.6	862.457	978037	977338	163.326	0.163326
116	-1.8	-79.1	2704.7	831.743	978037	977365	159.003	0.159003
117	-1.8	-79.1	2424.8	745.738	978038	977440	147.942	0.147942
118	-1.8	-79.2	2153.7	662.398	978038	977517	142.037	0.142037
119	-1.7	-78.8	3101.6	953.707	978037	977211	127.615	0.127615
120	-1.6	-78.8	3348.1	1029.457	978037	977143	136.032	0.136032
121	-1.6	-78.8	3605.2	1108.445	978037	977102	173.434	0.173434
122	-1.6	-78.9	3183.4	978.860	978037	977208	150.483	0.150483
123	-1.6	-79.0	2622.4	806.473	978037	977343	113.008	0.113008
124	-1.6	-78.8	3240.0	996.238	978037	977166	125.317	0.125317
125	-1.6	-78.8	3473.1	1067.868	978037	977122	153.351	0.153351
126	-1.6	-78.8	4029.5	1238.772	978037	977032	234.039	0.234039
127	-1.6	-79.0	2697.4	829.523	978037	977323	116.200	0.116200
128	-1.6	-79.0	2681.5	824.633	978037	977340	127.711	0.127711
129	-1.6	-79.0	2902.4	892.495	978037	977304	159.815	0.159815
130	-1.6	-79.1	3179.2	977.561	978037	977247	187.715	0.187715
131	-1.6	-79.1	2736.8	841.626	978037	977332	137.081	0.137081
132	-1.6	-79.1	2242.8	689.795	978036	977435	88.156	0.088156
133	-1.6	-79.1	1186.4	364.987	978036	977663	-8.762	-0.008762
134	-1.6	-79.0	3041.6	935.286	978037	977274	172.263	0.172263
135	-1.6	-79.1	3112.6	957.090	978037	977259	179.463	0.179463
136	-1.6	-79.1	2984.0	917.587	978037	977287	168.398	0.168398
137	-1.6	-79.1	2502.6	769.651	978037	977383	116.412	0.116412
138	-1.6	-79.1	1991.1	612.402	978036	977489	65.252	0.065252
139	-1.7	-79.0	2504.3	770.146	978037	977390	122.966	0.122966
140	-1.6	-79.2	853.7	262.659	978036	977735	-38.352	-0.038352
141	-1.6	-79.2	979.3	301.275	978036	977724	-11.649	-0.011649
142	-1.6	-79.2	415.2	127.759	978037	977849	-60.165	-0.060165
143	-1.6	-79.2	376.7	115.905	978037	977860	-60.379	-0.060379
144	-1.6	-79.3	336.3	103.487	978037	977881	-52.017	-0.052017
145	-1.6	-79.3	178.8	55.029	978037	977932	-49.744	-0.049744
146	-1.6	-79.4	17.3	5.315	978037	977966	-64.896	-0.064896
147	-1.6	-79.2	1061.2	326.479	978036	977692	-18.302	-0.018302
148	-1.6	-79.2	589.3	181.310	978036	977804	-51.450	-0.051450
149	-1.6	-79.2	508.6	156.488	978036	977821	-58.857	-0.058857
150	-1.6	-79.3	364.9	112.279	978037	977866	-58.423	-0.058423
151	-1.6	-79.3	198.9	61.207	978037	977925	-50.818	-0.050818
152	-1.6	-79.4	14.0	4.294	978036	977962	-70.420	-0.070420
153	-1.6	-79.5	12.9	3.956	978036	977964	-68.006	-0.068006
154	-1.6	-79.5	13.5	4.158	978036	977969	-63.284	-0.063284
155	-1.6	-79.4	14.7	4.512	978036	977963	-68.540	-0.068540

156	-1.6	-79.4	12.6	3.868	978036	977963	-69.250	-0.069250
157	-1.6	-79.5	14.0	4.300	978036	977965	-67.416	-0.067416
158	-1.6	-79.5	14.1	4.328	978036	977967	-64.971	-0.064971

*Lat° = Latitud en grados decimales; Long° = Longitud y Hn = Altura Nivelada Geométricamente*  
*Fuente: Departamento de Geodesia del IGM; Recopilado por: Kirby E.*  
*Nota: los valores de la latitud, longitud y Hn están truncados debido a los compromiso de confidencialidad de datos*

A partir de los resultados obtenidos, representados en la Tabla 4.10, se puede generar un mapa de anomalías de aire libre, ver figura 4.2

Figura 4.2 Mapa de Anomalías de Aire Libre



#### 4. 6 RESULTADOS DE LOS 158 PUNTOS CON DENSIDAD MEDIA OBTENIDOS A PARTIR DEL MODELO DIGITAL DE VARIACIÓN LATERAL DE DENSIDADES.

PUNTO	LAT°	LONG°	$\rho$ media(gr/cm3)
1	-1.82	-79.36	2.58
2	-1.84	-79.34	2.58
3	-1.78	-79.28	2.58

4	-1.77	-79.23	2.58
5	-1.86	-79.39	2.58
6	-1.80	-79.30	2.58
7	-1.77	-79.24	2.58
8	-1.77	-79.18	2.58
9	-1.80	-79.48	2.58
10	-1.85	-79.41	2.58
11	-1.82	-79.32	2.58
12	-1.77	-79.27	2.58
13	-1.84	-79.44	2.58
14	-1.86	-79.36	2.58
15	-1.79	-79.29	2.58
16	-1.77	-79.19	2.58
17	-1.98	-78.73	2.75
18	-1.90	-78.72	2.62
19	-1.83	-78.74	2.62
20	-1.71	-78.77	2.62
21	-1.93	-78.71	2.62
22	-1.80	-78.74	2.62
23	-1.69	-78.77	2.62
24	-1.65	-78.70	2.62
25	-1.96	-78.72	2.75
26	-1.87	-78.73	2.62
27	-1.74	-78.76	2.62
28	-1.65	-78.75	2.62
29	-1.66	-78.68	2.62
30	-1.93	-78.71	2.62
31	-1.77	-78.75	2.62
32	-1.49	-78.73	2.62
33	-1.59	-78.70	2.62
34	-1.51	-78.71	2.62
35	-1.44	-78.67	2.62
36	-1.38	-78.65	2.62
37	-1.32	-78.64	2.62
38	-1.23	-78.61	2.62
39	-1.22	-78.59	2.62
40	-1.14	-78.59	2.62
41	-1.62	-78.68	2.62
42	-1.54	-78.73	2.62
43	-1.49	-78.70	2.62
44	-1.43	-78.66	2.62
45	-1.39	-78.65	2.62
46	-1.38	-78.65	2.62
47	-1.29	-78.63	2.62
48	-1.24	-78.63	2.62
49	-1.08	-78.59	2.62
50	-1.03	-78.59	2.62
51	-1.67	-78.66	2.62
52	-1.56	-78.73	2.62
53	-1.46	-78.69	2.62
54	-1.42	-78.65	2.62
55	-1.34	-78.65	2.62
56	-1.27	-78.63	2.62
57	-1.18	-78.59	2.62
58	-1.11	-78.59	2.62
59	-1.28	-78.65	2.62
60	-1.31	-78.70	2.62
61	-1.32	-78.75	2.62
62	-1.32	-78.78	2.62
63	-1.37	-78.82	2.62
64	-1.42	-78.87	2.62
65	-1.46	-78.94	2.62
66	-1.50	-78.99	2.62
67	-1.58	-79.00	2.62



68	-1.62	-79.01	2.62
69	-1.71	-79.03	2.58
70	-1.74	-79.06	2.58
71	-1.81	-79.07	2.58
72	-1.83	-79.14	2.58
73	-1.79	-79.17	2.58
74	-1.78	-79.17	2.58
75	-1.28	-78.64	2.62
76	-1.30	-78.69	2.62
77	-1.31	-78.74	2.62
78	-1.33	-78.77	2.62
79	-1.34	-78.80	2.62
80	-1.35	-78.81	2.62
81	-1.40	-78.85	2.62
82	-1.44	-78.93	2.62
83	-1.48	-78.95	2.62
84	-1.52	-78.99	2.62
85	-1.56	-79.01	2.62
86	-1.64	-79.01	2.58
87	-1.69	-79.03	2.58
88	-1.71	-79.04	2.58
89	-1.78	-79.06	2.58
90	-1.81	-79.11	2.58
91	-1.82	-79.16	2.58
92	-1.79	-79.18	2.58
93	-1.26	-78.61	2.62
94	-1.29	-78.61	2.62
95	-1.32	-78.60	2.62
96	-1.32	-78.58	2.62
97	-1.33	-78.55	2.62
98	-1.33	-78.53	2.62
99	-1.61	-79.00	2.62
100	-1.68	-79.03	2.58
101	-1.72	-79.05	2.58
102	-1.80	-79.06	2.58
103	-1.81	-79.12	2.58
104	-1.81	-79.16	2.58
105	-1.28	-78.66	2.62
106	-1.31	-78.72	2.62
107	-1.34	-78.76	2.62
108	-1.36	-78.80	2.62
109	-1.38	-78.84	2.62
110	-1.43	-78.90	2.62
111	-1.49	-78.98	2.62
112	-1.53	-79.00	2.62
113	-1.59	-79.00	2.62
114	-1.67	-79.01	2.58
115	-1.73	-79.06	2.58
116	-1.75	-79.06	2.58
117	-1.81	-79.09	2.58
118	-1.82	-79.16	2.58
119	-1.66	-78.75	2.62
120	-1.62	-78.81	2.62
121	-1.63	-78.83	2.62
122	-1.61	-78.91	2.62
123	-1.60	-78.99	2.62
124	-1.63	-78.79	2.62
125	-1.62	-78.82	2.62
126	-1.65	-78.84	2.62
127	-1.60	-78.99	2.62
128	-1.61	-79.01	2.62
129	-1.61	-79.04	2.58
130	-1.60	-79.06	2.58
131	-1.60	-79.08	2.58

132	-1.59	-79.11	2.58
133	-1.57	-79.15	2.58
134	-1.61	-79.04	2.58
135	-1.60	-79.06	2.58
136	-1.59	-79.07	2.58
137	-1.60	-79.09	2.58
138	-1.58	-79.11	2.58
139	-1.70	-79.04	2.58
140	-1.58	-79.17	2.58
141	-1.58	-79.19	2.58
142	-1.61	-79.24	2.58
143	-1.62	-79.25	2.58
144	-1.63	-79.27	2.58
145	-1.62	-79.33	2.58
146	-1.59	-79.40	2.58
147	-1.58	-79.15	2.58
148	-1.58	-79.21	2.58
149	-1.58	-79.22	2.58
150	-1.62	-79.25	2.58
151	-1.63	-79.31	2.58
152	-1.59	-79.42	2.58
153	-1.58	-79.46	2.58
154	-1.57	-79.50	2.58
155	-1.58	-79.40	2.58
156	-1.58	-79.44	2.58
157	-1.57	-79.47	2.58
158	-1.57	-79.49	2.58

*Lat° = Latitud en grados decimales; Long° = Longitud*  
*Fuente: Tierra A., 2003; Departamento de Geodesia del IGM; Recopilado por: Kirby E.*  
*Nota: los valores de la latitud, longitud, están truncados debido a los compromisos de confidencialidad de datos*

Cómo estadísticas de los puntos resultado de la Tabla 4.11, se tiene como valor medio  $2.6042 \text{ gr/cm}^3$ , y cómo valor máximo y mínimo a  $2.75$  y  $2.58 \text{ gr/cm}^3$  respectivamente.

## 4.7 CÁLCULOS Y RESULTADOS DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER SIMPLE

Los cálculos realizados en las anomalías de Bouguer Simple, fueron aplicando las ecuaciones descritas en la sección 2.3.2 y 2.3.3

En el cálculo de estas anomalías se utilizó la ecuación 2.33. Los valores utilizados de anomalías de aire libre, son los representados en la tabla 4.10 y para el cálculo del plato de Bouguer se aplicó la ecuación 2.30.

Como se dijo en la sección 3.6, para el cálculo del plato de Bouguer, primeramente se aplicó una densidad de  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  en la ecuación 2.30 y luego se volvió a calcular éste plato de Bouguer para cada punto, con los resultados de densidades del Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades de la Tabla 4.11.

Los resultados de las Anomalías de Bouguer Simple están en unidades miligales (mgal). Para obtener estas unidades, las anomalías de aire libre deben estar en miligales y para el caso del plato de Bouguer: la densidad debe estar en  $\text{Kg/m}^3$ , para obtener como resultado de la aplicación de la ecuación 2.30,  $\text{m/s}^2$  y posteriormente transformar estas

unidades a mgal ( $1\text{cm/s}^2 = 1\text{gal}$ ). Ver los resultados de anomalías de Bouguer simple y sus estadísticas en la Tabla 4.12

Tabla 4.12 Anomalías de Bouguer Simple

PTO	LAT°	LONG°	Hn(m)	ρ=MDVLD	CAL	γ(mgal)	g(mgal)	ΔgAL(mgal)	DENSIDAD CONSTANTE = 2.67 gr/cm3 (1)		DENSIDAD = MDVLD (2)		Dif = (2)-(1)
									CB(mgal) ρ=(1)	ΔgB(mgal)1	CB(mgal) ρ=(2)	ΔgB(mgal)2	
1	-1.82	-79.36	7.8	2.58	2.395	978038	978048	12.542	0.871	11.670	0.842	11.700	0.029
2	-1.84	-79.34	13.5	2.58	4.156	978038	977998	-36.146	1.512	-37.658	1.461	-37.607	0.051
3	-1.78	-79.28	113.8	2.58	35.023	978037	977955	-46.984	12.740	-59.723	12.310	-59.294	0.429
4	-1.77	-79.23	403.1	2.58	124.033	978037	977888	-25.739	45.121	-70.860	43.600	-69.339	1.521
5	-1.86	-79.39	12	2.58	3.688	978038	978021	-13.201	1.341	-14.542	1.296	-14.497	0.045
6	-1.8	-79.3	36.7	2.58	11.293	978038	977981	-44.954	4.108	-49.062	3.969	-48.923	0.138
7	-1.77	-79.24	306.8	2.58	94.406	978037	977911	-31.970	34.342	-66.312	33.185	-65.155	1.158
8	-1.77	-79.18	790.6	2.58	243.248	978037	977780	-14.454	88.496	-102.951	85.513	-99.968	2.983
9	-1.8	-79.48	6.9	2.58	2.121	978038	978054	18.788	0.772	18.017	0.746	18.043	0.026
10	-1.85	-79.41	10.7	2.58	3.293	978038	978033	-1.981	1.198	-3.179	1.157	-3.139	0.040
11	-1.82	-79.32	18.8	2.58	5.791	978038	977987	-45.106	2.106	-47.212	2.035	-47.141	0.071
12	-1.77	-79.27	172.1	2.58	52.947	978037	977939	-45.039	19.260	-64.299	18.611	-63.649	0.649
13	-1.84	-79.44	12.3	2.58	3.784	978038	978042	8.315	1.377	6.939	1.330	6.985	0.046
14	-1.86	-79.36	10.6	2.58	3.268	978038	978010	-25.022	1.189	-26.211	1.149	-26.171	0.040
15	-1.79	-79.29	54.7	2.58	16.816	978038	977973	-47.786	6.117	-53.903	5.911	-53.697	0.206
16	-1.77	-79.19	621.1	2.58	191.096	978037	977826	-20.555	69.520	-90.076	67.177	-87.732	2.343
17	-1.98	-78.73	3140.4	2.75	965.654	978039	977234	161.413	351.510	-190.097	362.043	-200.629	-10.532
18	-1.9	-78.72	3187.7	2.62	980.185	978038	977213	155.368	356.804	-201.436	350.122	-194.755	6.682
19	-1.83	-78.74	3205.1	2.62	985.514	978038	977189	136.539	358.745	-222.206	352.027	-215.488	6.718
20	-1.71	-78.77	3212.9	2.62	987.904	978037	977189	139.951	359.616	-219.665	352.882	-212.931	6.734
21	-1.93	-78.71	3140.5	2.62	965.658	978038	977226	153.765	351.512	-197.747	344.929	-191.164	6.583
22	-1.8	-78.74	3247	2.62	998.394	978038	977179	140.037	363.437	-223.401	356.631	-216.595	6.806
23	-1.69	-78.77	3204.6	2.62	985.374	978037	977191	139.040	358.694	-219.655	351.977	-212.937	6.717
24	-1.65	-78.7	2902.7	2.62	892.611	978037	977268	123.408	324.904	-201.496	318.820	-195.411	6.084
25	-1.96	-78.72	3101.4	2.75	953.659	978039	977242	157.122	347.141	-190.019	357.542	-200.420	-10.401
26	-1.87	-78.73	3157.8	2.62	971.001	978038	977206	139.424	353.458	-214.035	346.839	-207.416	6.619
27	-1.74	-78.76	3309.6	2.62	1017.623	978037	977166	145.930	370.442	-224.512	363.505	-217.575	6.937
28	-1.65	-78.75	3095.5	2.62	951.844	978037	977210	124.692	346.480	-221.788	339.992	-215.300	6.488
29	-1.66	-78.68	2804	2.62	862.267	978037	977289	114.655	313.852	-199.196	307.974	-193.319	5.877
30	-1.93	-78.71	3064.4	2.62	942.276	978038	977243	146.924	342.994	-196.070	336.571	-189.647	6.423
31	-1.77	-78.75	3305.5	2.62	1016.363	978037	977168	146.677	369.984	-223.306	363.055	-216.378	6.929
32	-1.49	-78.73	3042.4	2.62	935.532	978036	977232	131.471	340.538	-209.067	334.161	-202.690	6.377
33	-1.59	-78.7	3004.4	2.62	923.851	978037	977224	110.834	336.283	-225.449	329.986	-219.151	6.297
34	-1.51	-78.71	3495.3	2.62	1074.670	978036	977103	141.982	391.226	-249.244	383.900	-241.918	7.326
35	-1.44	-78.67	3357	2.62	1032.184	978036	977135	131.055	375.747	-244.693	368.711	-237.656	7.036

36	-1.38	-78.65	3189.2	2.62	980.619	978036	977173	118.264	356.962	-238.698	350.277	-232.014	6.685
37	-1.32	-78.64	2906.3	2.62	893.716	978035	977220	78.122	325.306	-247.184	319.214	-241.093	6.092
38	-1.23	-78.61	2470.2	2.62	759.669	978035	977304	28.435	276.486	-248.051	271.308	-242.874	5.178
39	-1.22	-78.59	2580.7	2.62	793.649	978035	977289	47.479	288.860	-241.382	283.451	-235.972	5.409
40	-1.14	-78.59	2673.5	2.62	822.173	978035	977263	50.280	299.249	-248.969	293.645	-243.365	5.604
41	-1.62	-78.68	2907.4	2.62	894.033	978037	977263	119.932	325.422	-205.490	319.328	-199.396	6.094
42	-1.54	-78.73	3330.9	2.62	1024.157	978036	977134	121.565	372.823	-251.257	365.841	-244.276	6.982
43	-1.49	-78.7	3602.4	2.62	1107.577	978036	977082	153.555	403.216	-249.662	395.665	-242.111	7.551
44	-1.43	-78.66	3166.4	2.62	973.616	978036	977179	116.596	354.411	-237.815	347.774	-231.178	6.637
45	-1.39	-78.65	3201.3	2.62	984.338	978036	977172	120.285	358.317	-238.032	351.607	-231.322	6.710
46	-1.38	-78.65	3076.9	2.62	946.144	978036	977189	100.048	344.403	-244.355	337.954	-237.906	6.450
47	-1.29	-78.63	2790.8	2.62	858.207	978035	977240	62.880	312.373	-249.493	306.523	-243.643	5.850
48	-1.24	-78.63	2575.9	2.62	792.171	978035	977279	35.880	288.322	-252.442	282.923	-247.042	5.399
49	-1.08	-78.59	2663.7	2.62	819.138	978034	977254	38.879	298.143	-259.265	292.560	-253.682	5.583
50	-1.03	-78.59	2655.1	2.62	816.494	978034	977247	29.500	297.181	-267.681	291.615	-262.116	5.565
51	-1.67	-78.66	2769.2	2.62	851.580	978037	977292	106.745	309.959	-203.214	304.155	-197.410	5.804
52	-1.56	-78.73	3164.8	2.62	973.129	978036	977173	109.367	354.233	-244.867	347.600	-238.233	6.634
53	-1.46	-78.69	3523.6	2.62	1083.366	978036	977099	146.340	394.394	-248.055	387.009	-240.669	7.386
54	-1.42	-78.65	3194.5	2.62	982.272	978036	977172	119.070	357.564	-238.494	350.868	-231.798	6.696
55	-1.34	-78.65	3014.4	2.62	926.916	978035	977200	91.610	337.399	-245.789	331.081	-239.471	6.318
56	-1.27	-78.63	2744	2.62	843.842	978035	977245	53.897	307.141	-253.243	301.389	-247.492	5.752
57	-1.18	-78.59	2692	2.62	827.859	978035	977263	56.378	301.320	-244.942	295.677	-239.299	5.643
58	-1.11	-78.59	2701.3	2.62	830.715	978034	977252	47.942	302.360	-254.418	296.698	-248.756	5.662
59	-1.28	-78.65	2964.2	2.62	911.484	978035	977199	75.259	331.778	-256.519	325.565	-250.306	6.213
60	-1.31	-78.7	3161.2	2.62	972.032	978035	977160	96.363	353.834	-257.471	347.208	-250.845	6.626
61	-1.32	-78.75	3574.5	2.62	1099.010	978035	977080	143.668	400.094	-256.426	392.602	-248.934	7.492
62	-1.32	-78.78	3717.9	2.62	1143.048	978035	977062	170.086	416.141	-246.055	408.348	-238.262	7.793
63	-1.37	-78.82	4039.6	2.62	1241.866	978035	977014	220.264	452.151	-231.887	443.683	-223.420	8.467
64	-1.42	-78.87	4028.1	2.62	1238.332	978036	977050	253.063	450.863	-197.800	442.420	-189.357	8.443
65	-1.46	-78.94	4027.3	2.62	1238.089	978036	977027	229.345	450.774	-221.430	442.333	-212.988	8.441
66	-1.5	-78.99	3492.9	2.62	1073.940	978036	977147	184.500	390.960	-206.460	383.639	-199.139	7.321
67	-1.58	-79	2796.1	2.62	859.840	978036	977310	133.153	312.968	-179.815	307.107	-173.954	5.861
68	-1.62	-79.01	2576.1	2.62	792.241	978037	977358	113.433	288.348	-174.915	282.948	-169.515	5.400
69	-1.71	-79.03	2437.3	2.58	749.579	978037	977402	114.301	272.811	-158.510	263.615	-149.314	9.196
70	-1.74	-79.06	2878.6	2.58	885.197	978037	977324	171.926	322.203	-150.278	311.342	-139.417	10.861
71	-1.81	-79.07	2329.5	2.58	716.428	978038	977451	129.879	260.739	-130.860	251.950	-122.071	8.789
72	-1.83	-79.14	2220.4	2.58	682.894	978038	977501	146.386	248.529	-102.143	240.151	-93.765	8.377
73	-1.79	-79.17	1529.4	2.58	470.449	978038	977642	75.134	171.185	-96.050	165.415	-90.280	5.770
74	-1.78	-79.17	225.2	2.58	69.288	978037	977741	-227.362	25.204	-252.566	24.355	-251.717	0.850
75	-1.28	-78.64	2803.8	2.62	862.205	978035	977233	60.152	313.829	-253.677	307.952	-247.800	5.877

76	-1.3	-78.69	3093.4	2.62	951.198	978035	977173	89.161	346.245	-257.084	339.761	-250.600	6.484
77	-1.31	-78.74	3420.5	2.62	1051.694	978035	977110	126.194	382.855	-256.662	375.686	-249.492	7.170
78	-1.33	-78.77	3604.6	2.62	1108.255	978035	977080	152.513	403.463	-250.950	395.908	-243.395	7.555
79	-1.34	-78.8	3799.7	2.62	1168.199	978035	977054	186.660	425.305	-238.645	417.341	-230.680	7.965
80	-1.35	-78.81	4000.7	2.62	1229.923	978035	977017	211.392	447.798	-236.406	439.412	-228.021	8.386
81	-1.4	-78.85	4019.7	2.62	1235.749	978036	977041	241.033	449.921	-208.889	441.496	-200.463	8.425
82	-1.44	-78.93	4135.9	2.62	1271.452	978036	977011	246.583	462.933	-216.350	454.264	-207.681	8.669
83	-1.48	-78.95	3674.9	2.62	1129.866	978036	977102	195.453	411.337	-215.885	403.634	-208.182	7.703
84	-1.52	-78.99	3172.2	2.62	975.424	978036	977220	159.241	355.070	-195.829	348.420	-189.179	6.649
85	-1.56	-79.01	2913.8	2.62	896.019	978036	977286	145.162	326.145	-180.983	320.038	-174.875	6.108
86	-1.64	-79.01	2467	2.58	758.694	978037	977377	99.053	276.131	-177.078	266.823	-167.770	9.308
87	-1.69	-79.03	2369.2	2.58	728.630	978037	977412	103.339	265.183	-161.843	256.244	-152.905	8.939
88	-1.71	-79.04	2440.5	2.58	750.546	978037	977402	115.203	273.163	-157.960	263.956	-148.752	9.208
89	-1.78	-79.06	2545.5	2.58	782.818	978037	977399	144.426	284.916	-140.490	275.312	-130.886	9.604
90	-1.81	-79.11	2433.5	2.58	748.406	978038	977444	154.345	272.384	-118.039	263.203	-108.858	9.181
91	-1.82	-79.16	1854.5	2.58	570.412	978038	977582	114.256	207.575	-93.319	200.578	-86.322	6.997
92	-1.79	-79.18	1210.3	2.58	372.321	978038	977713	47.741	135.468	-87.728	130.902	-83.161	4.566
93	-1.26	-78.61	2641.7	2.62	812.375	978035	977268	45.674	295.680	-250.007	290.143	-244.470	5.537
94	-1.29	-78.61	2656.3	2.62	816.873	978035	977274	55.641	297.319	-241.678	291.751	-236.110	5.568
95	-1.32	-78.6	2641.6	2.62	812.375	978035	977285	62.017	295.680	-233.663	290.143	-228.126	5.537
96	-1.32	-78.58	2721.1	2.62	836.799	978035	977278	79.492	304.576	-225.084	298.872	-219.380	5.704
97	-1.33	-78.55	2606.9	2.62	801.697	978035	977307	73.692	291.792	-218.100	286.327	-212.635	5.464
98	-1.33	-78.53	2464.3	2.62	757.875	978035	977339	61.808	275.832	-214.024	270.667	-208.859	5.165
99	-1.61	-79	2538.9	2.62	780.807	978037	977366	110.174	284.184	-174.010	278.862	-168.688	5.322
100	-1.68	-79.03	2477.2	2.58	761.839	978037	977387	112.332	277.276	-164.944	267.930	-155.597	9.346
101	-1.72	-79.05	2651.8	2.58	815.487	978037	977367	144.939	296.814	-151.875	286.809	-141.870	10.005
102	-1.8	-79.06	2469.5	2.58	759.473	978038	977416	137.807	276.414	-138.607	267.097	-129.290	9.317
103	-1.81	-79.12	2361.5	2.58	726.267	978038	977458	146.247	264.322	-118.075	255.413	-109.166	8.910
104	-1.81	-79.16	1693.8	2.58	521.017	978038	977610	93.514	189.593	-96.079	183.202	-89.688	6.391
105	-1.28	-78.66	3012.6	2.62	926.362	978035	977189	80.192	337.198	-257.005	330.883	-250.691	6.315
106	-1.31	-78.72	3251.6	2.62	999.811	978035	977142	106.512	363.953	-257.441	357.138	-250.626	6.816
107	-1.34	-78.76	3621.5	2.62	1113.449	978035	977074	151.647	405.356	-253.708	397.765	-246.117	7.591
108	-1.36	-78.8	3893.8	2.62	1197.094	978035	977035	196.235	435.835	-239.599	427.673	-231.438	8.162
109	-1.38	-78.84	4080.8	2.62	1254.518	978036	977021	240.090	456.762	-216.672	448.208	-208.118	8.554
110	-1.43	-78.9	4160.5	2.62	1279.015	978036	977022	265.633	465.690	-200.057	456.969	-191.336	8.721
111	-1.49	-78.98	3541.6	2.62	1088.903	978036	977131	183.371	396.412	-213.042	388.989	-205.618	7.423
112	-1.53	-79	3081.8	2.62	947.645	978036	977243	154.314	344.950	-190.637	338.491	-184.177	6.460
113	-1.59	-79	2666.8	2.62	820.102	978037	977338	121.601	298.495	-176.893	292.905	-171.304	5.590
114	-1.67	-79.01	2514.2	2.58	773.204	978037	977369	105.025	281.415	-176.389	271.929	-166.904	9.486
115	-1.73	-79.06	2804.6	2.58	862.457	978037	977338	163.326	313.921	-150.594	303.339	-140.013	10.582

116	-1.75	-79.06	2704.7	2.58	831.743	978037	977365	159.003	302.734	-143.731	292.530	-133.527	10.205
117	-1.81	-79.09	2424.8	2.58	745.738	978038	977440	147.942	271.413	-123.470	262.264	-114.322	9.149
118	-1.82	-79.16	2153.7	2.58	662.398	978038	977517	142.037	241.065	-99.029	232.940	-90.903	8.126
119	-1.66	-78.75	3101.6	2.62	953.707	978037	977211	127.615	347.158	-219.543	340.657	-213.042	6.501
120	-1.62	-78.81	3348.1	2.62	1029.457	978037	977143	136.032	374.754	-238.721	367.736	-231.704	7.018
121	-1.63	-78.83	3605.2	2.62	1108.445	978037	977102	173.434	403.532	-230.099	395.975	-222.542	7.557
122	-1.61	-78.91	3183.4	2.62	978.860	978037	977208	150.483	356.321	-205.838	349.649	-199.165	6.673
123	-1.6	-78.99	2622.4	2.62	806.473	978037	977343	113.008	293.531	-180.523	288.034	-175.026	5.497
124	-1.63	-78.79	3240	2.62	996.238	978037	977166	125.317	362.652	-237.335	355.861	-230.544	6.791
125	-1.62	-78.82	3473.1	2.62	1067.868	978037	977122	153.351	388.748	-235.397	381.468	-228.117	7.280
126	-1.65	-78.84	4029.5	2.62	1238.772	978037	977032	234.039	451.023	-216.984	442.577	-208.538	8.446
127	-1.6	-78.99	2697.4	2.62	829.523	978037	977323	116.200	301.926	-185.725	296.272	-180.071	5.654
128	-1.61	-79.01	2681.5	2.62	824.633	978037	977340	127.711	300.145	-172.434	294.524	-166.813	5.621
129	-1.61	-79.04	2902.4	2.58	892.495	978037	977304	159.815	324.862	-165.047	313.911	-154.097	10.950
130	-1.6	-79.06	3179.2	2.58	977.561	978037	977247	187.715	355.848	-168.133	343.853	-156.138	11.995
131	-1.6	-79.08	2736.8	2.58	841.626	978037	977332	137.081	306.334	-169.252	296.008	-158.926	10.326
132	-1.59	-79.11	2242.8	2.58	689.795	978036	977435	88.156	251.042	-162.885	242.580	-154.423	8.462
133	-1.57	-79.15	1186.4	2.58	364.987	978036	977663	-8.762	132.799	-141.561	128.323	-137.084	4.476
134	-1.61	-79.04	3041.6	2.58	935.286	978037	977274	172.263	340.448	-168.186	328.973	-156.710	11.476
135	-1.6	-79.06	3112.6	2.58	957.090	978037	977259	179.463	348.391	-168.928	336.647	-157.184	11.744
136	-1.59	-79.07	2984	2.58	917.587	978037	977287	168.398	334.001	-165.604	322.743	-154.345	11.258
137	-1.6	-79.09	2502.6	2.58	769.651	978037	977383	116.412	280.121	-163.709	270.679	-154.267	9.442
138	-1.58	-79.11	1991.1	2.58	612.402	978036	977489	65.252	222.862	-157.610	215.350	-150.098	7.512
139	-1.7	-79.04	2504.3	2.58	770.146	978037	977390	122.966	280.301	-157.336	270.853	-147.887	9.448
140	-1.58	-79.17	853.7	2.58	262.659	978036	977735	-38.352	95.560	-133.912	92.339	-130.691	3.221
141	-1.58	-79.19	979.3	2.58	301.275	978036	977724	-11.649	109.612	-121.261	105.918	-117.566	3.695
142	-1.61	-79.24	415.2	2.58	127.759	978037	977849	-60.165	46.476	-106.641	44.910	-105.075	1.567
143	-1.62	-79.25	376.7	2.58	115.905	978037	977860	-60.379	42.164	-102.543	40.742	-101.122	1.421
144	-1.63	-79.27	336.3	2.58	103.487	978037	977881	-52.017	37.646	-89.663	36.377	-88.394	1.269
145	-1.62	-79.33	178.8	2.58	55.029	978037	977932	-49.744	20.017	-69.761	19.343	-69.087	0.675
146	-1.59	-79.4	17.3	2.58	5.315	978037	977966	-64.896	1.933	-66.829	1.868	-66.764	0.065
147	-1.58	-79.15	1061.2	2.58	326.479	978036	977692	-18.302	118.785	-137.086	114.781	-133.082	4.004
148	-1.58	-79.21	589.3	2.58	181.310	978036	977804	-51.450	65.960	-117.410	63.736	-115.187	2.223
149	-1.58	-79.22	508.6	2.58	156.488	978036	977821	-58.857	56.929	-115.786	55.010	-113.867	1.919
150	-1.62	-79.25	364.9	2.58	112.279	978037	977866	-58.423	40.844	-99.267	39.468	-97.890	1.377
151	-1.63	-79.31	198.9	2.58	61.207	978037	977925	-50.818	22.265	-73.083	21.514	-72.333	0.751
152	-1.59	-79.42	14	2.58	4.294	978036	977962	-70.420	1.562	-71.982	1.509	-71.930	0.053
153	-1.58	-79.46	12.9	2.58	3.956	978036	977964	-68.006	1.439	-69.445	1.391	-69.397	0.049
154	-1.57	-79.5	13.5	2.58	4.158	978036	977969	-63.284	1.513	-64.797	1.462	-64.746	0.051
155	-1.58	-79.4	14.7	2.58	4.512	978036	977963	-68.540	1.641	-70.182	1.586	-70.126	0.055

156	-1.58	-79.44	12.6	2.58	3.868	978036	977963	-69.250	1.407	-70.657	1.360	-70.610	0.047
157	-1.57	-79.47	14	2.58	4.300	978036	977965	-67.416	1.564	-68.980	1.511	-68.927	0.053
158	-1.57	-79.49	14.1	2.58	4.328	978036	977967	-64.971	1.574	-66.546	1.521	-66.493	0.053

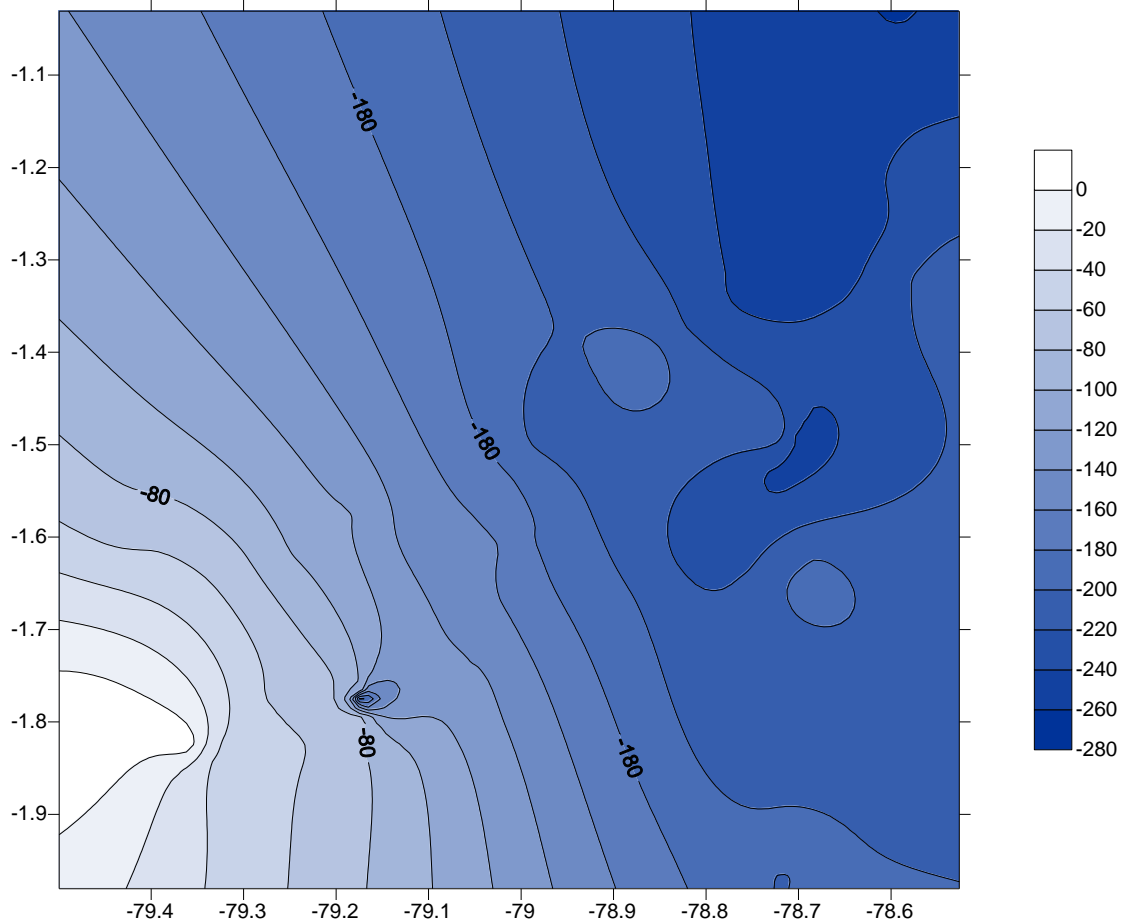
ESTADÍSTICAS	p=MDVLD	CAL	$\gamma$ (mgal)	g(mgal)	$\Delta gAL$ (mgal)	CB(mgal) p=(1)	$\Delta gB$ (mgal)1	CB(mgal) p=(2)	$\Delta gB$ (mgal)2	Dif = (2)-(1)
Media Aritmética	2.6042	720.680	978036.5	977404.4	88.57355	262.32886	-173.75531	256.69611	-168.12256	5.63275
Desviación Estándar (muestra)	0.0258	386.532	1.0	309.8	87.71208	140.71945	71.62899	138.26617	69.89811	3.59568
Max	2.75	1279.015	978038.7	978054.3	265.63262	465.68951	18.01668	456.96873	18.04269	11.99488
Min	2.58	2.121	978034.2	977010.9	-227.36178	0.77153	-267.68096	0.74553	-262.11578	-10.53215

Lat° = Latitud en grados decimales; Long° = Longitud en grados decimales; Hn= Altura nivelada geoméricamente; p=MDVLD =densidad para c/punto obtenida del MDVLD;  $\gamma$ (mgal) = gravedad normal en mgal; g(mgal) = gravedad observada en mgal;  $\Delta gAL$ (mgal)= Anomalía de Aire Libre en mgal;  $\Delta gB$ (mgal)= Anomalías de Bouguer Simple en unidades miligales (mgal); (1)=densidad constante igual a 2.67 gr/cm<sup>3</sup>; (2)=densidad para c/u de los 158 puntos, obtenida a partir del Modelo Digital de Variación Lateral de Densidades (MDVLD) Fuente: Tierra A., 2003; Departamento de Geodesia del IGM; Recopilado por: Kirby E. Nota: los valores de la latitud, longitud, Hn y gravedad observada están truncados debido a los compromisos de confidencialidad de datos

A partir de los resultados obtenidos, representados en la Tabla 4.12, para el caso de Anomalías de Bouguer Simple con densidades obtenidas por medio del MDVLD, se puede generar un mapa de Anomalías de Bouguer Simple, ver figura 4.3



**Figura 4.3 Mapa de Anomalías de Bouguer Simple**



**4. 8 RESULTADOS DE LA CORRECCIÓN DEL TERRENO OBTENIDOS UTILIZANDO EL PROGRAMA TC (TOPOGRAPHY CORRECTION)**

Los resultados de la corrección del terreno obtenidos utilizando el programa TC, están representados en la Tabla 4.13, los valores que representan la corrección del terreno para una densidad media del área de estudio igual a 2.6 gr/cm<sup>3</sup> obtenida por medio del MDVLD, son aquellos que se encuentran en la penúltima columna y están en unidades miligales (mgal). Los valores de la última columna representan la diferencia entre la corrección del terreno con una densidad media área de estudio (2.6 gr/cm<sup>3</sup>) y la corrección del terreno calculada con una densidad constante igual a 2.67 gr/cm<sup>3</sup>.

Tabla 4.13 Corrección del Terreno						
PTO	LATITUD	LONGITUD	Hn (m)	CT1.267 (mgal) (1)	CT2.6 (mgal) (2)	DIF (2)-(1)
1	-1.82	-79.36	7.8	10.3119	<b>10.0415</b>	-0.270
2	-1.84	-79.34	13.5	12.9433	<b>12.604</b>	-0.339
3	-1.78	-79.28	113.8	17.1233	<b>16.6744</b>	-0.449
4	-1.77	-79.23	403.1	14.606	<b>14.223</b>	-0.383

5	-1.86	-79.39	12.0	8.8259	<b>8.5945</b>	-0.231
6	-1.80	-79.30	36.7	18.8632	<b>18.3686</b>	-0.495
7	-1.77	-79.24	306.8	6.6169	<b>6.4435</b>	-0.173
8	-1.77	-79.18	790.6	14.9699	<b>14.5774</b>	-0.393
9	-1.80	-79.48	6.9	7.7769	<b>7.573</b>	-0.204
10	-1.85	-79.41	10.7	9.1889	<b>8.948</b>	-0.241
11	-1.82	-79.32	18.8	17.155	<b>16.7053</b>	-0.450
12	-1.77	-79.27	172.1	14.7882	<b>14.4005</b>	-0.388
13	-1.84	-79.44	12.3	7.9622	<b>7.7535</b>	-0.209
14	-1.86	-79.36	10.6	8.4509	<b>8.2293</b>	-0.222
15	-1.79	-79.29	54.7	20.7735	<b>20.2289</b>	-0.545
16	-1.77	-79.19	621.1	11.5902	<b>11.2863</b>	-0.304
17	-1.98	-78.73	3140.4	36.5271	<b>35.5694</b>	-0.958
18	-1.90	-78.72	3187.7	40.7266	<b>39.6588</b>	-1.068
19	-1.83	-78.74	3205.1	73.1825	<b>71.2638</b>	-1.919
20	-1.71	-78.77	3212.9	21.8068	<b>21.235</b>	-0.572
21	-1.93	-78.71	3140.5	11.8218	<b>11.5118</b>	-0.310
22	-1.80	-78.74	3247.0	54.3677	<b>52.9424</b>	-1.425
23	-1.69	-78.77	3204.6	34.0181	<b>33.1262</b>	-0.892
24	-1.65	-78.70	2902.7	69.7909	<b>67.9612</b>	-1.830
25	-1.96	-78.72	3101.4	37.1546	<b>36.1805</b>	-0.974
26	-1.87	-78.73	3157.9	85.6413	<b>83.396</b>	-2.245
27	-1.74	-78.76	3309.6	36.4915	<b>35.5348</b>	-0.957
28	-1.65	-78.75	3095.5	92.0029	<b>89.5908</b>	-2.412
29	-1.66	-78.68	2804.0	54.7095	<b>53.2751</b>	-1.434
30	-1.93	-78.71	3064.4	21.7732	<b>21.2023</b>	-0.571
31	-1.77	-78.75	3305.5	42.3922	<b>41.2808</b>	-1.111
32	-1.49	-78.73	3042.4	55.0825	<b>53.6383</b>	-1.444
33	-1.59	-78.70	3004.4	89.7411	<b>87.3883</b>	-2.353
34	-1.51	-78.71	3495.3	19.0138	<b>18.5153</b>	-0.499
35	-1.44	-78.67	3357.0	18.6852	<b>18.1953</b>	-0.490
36	-1.38	-78.65	3189.2	43.2276	<b>42.0943</b>	-1.133
37	-1.32	-78.64	2906.3	21.5189	<b>20.9547</b>	-0.564
38	-1.23	-78.61	2470.2	53.0147	<b>51.6248</b>	-1.390
39	-1.22	-78.59	2580.7	39.4681	<b>38.4334</b>	-1.035
40	-1.14	-78.59	2673.5	71.3399	<b>69.4696</b>	-1.870
41	-1.62	-78.68	2907.4	71.6138	<b>69.7363</b>	-1.878
42	-1.54	-78.73	3330.9	56.6853	<b>55.1992</b>	-1.486
43	-1.49	-78.70	3602.4	8.5897	<b>8.3645</b>	-0.225
44	-1.43	-78.66	3166.4	9.1502	<b>8.9103</b>	-0.240
45	-1.39	-78.65	3201.3	47.138	<b>45.9022</b>	-1.236
46	-1.38	-78.65	3077.0	31.0237	<b>30.2103</b>	-0.813
47	-1.29	-78.63	2790.8	11.8492	<b>11.5386</b>	-0.311
48	-1.24	-78.63	2575.9	39.7718	<b>38.7291</b>	-1.043
49	-1.08	-78.59	2663.7	103.529	<b>100.8148</b>	-2.714
50	-1.03	-78.59	2655.1	134.2346	<b>130.7153</b>	-3.519
51	-1.67	-78.66	2769.2	41.6715	<b>40.579</b>	-1.093
52	-1.56	-78.73	3164.8	84.311	<b>82.1006</b>	-2.210
53	-1.46	-78.69	3523.6	11.2389	<b>10.9442</b>	-0.295
54	-1.42	-78.65	3194.5	30.8546	<b>30.0457</b>	-0.809
55	-1.34	-78.65	3014.4	28.905	<b>28.1472</b>	-0.758
56	-1.27	-78.63	2744.0	10.5766	<b>10.2993</b>	-0.277
57	-1.18	-78.59	2692.0	40.3856	<b>39.3268</b>	-1.059
58	-1.11	-78.59	2701.3	67.0549	<b>65.297</b>	-1.758
59	-1.28	-78.65	2964.2	25.7648	<b>25.0894</b>	-0.675
60	-1.31	-78.70	3161.2	14.6309	<b>14.2473</b>	-0.384
61	-1.32	-78.75	3574.5	46.0703	<b>44.8624</b>	-1.208
62	-1.32	-78.78	3717.9	47.5729	<b>46.3257</b>	-1.247
63	-1.37	-78.82	4039.6	46.9017	<b>45.672</b>	-1.230

64	-1.42	-78.87	4028.1	29.249	<b>28.4822</b>	-0.767
65	-1.46	-78.94	4027.3	88.4889	<b>86.1689</b>	-2.320
66	-1.50	-78.99	3492.9	19.0163	<b>18.5177</b>	-0.499
67	-1.58	-79.00	2796.1	110.382	<b>107.4881</b>	-2.894
68	-1.62	-79.01	2576.1	140.9611	<b>137.2655</b>	-3.696
69	-1.71	-79.03	2437.3	93.6123	<b>91.1581</b>	-2.454
70	-1.74	-79.06	2878.6	25.3916	<b>24.7259</b>	-0.666
71	-1.81	-79.07	2329.5	85.1681	<b>82.9352</b>	-2.233
72	-1.83	-79.14	2220.4	143.2783	<b>139.5219</b>	-3.756
73	-1.79	-79.17	1529.4	76.0324	<b>74.039</b>	-1.993
74	-1.78	-79.17	225.2	88.4732	<b>86.1537</b>	-2.320
75	-1.28	-78.64	2803.8	17.3576	<b>16.9025</b>	-0.455
76	-1.30	-78.69	3093.4	17.5959	<b>17.1346</b>	-0.461
77	-1.31	-78.74	3420.5	5.962	<b>5.8057</b>	-0.156
78	-1.33	-78.77	3604.6	40.9894	<b>39.9147</b>	-1.075
79	-1.34	-78.80	3799.7	17.9263	<b>17.4563</b>	-0.470
80	-1.35	-78.81	4000.7	33.364	<b>32.4893</b>	-0.875
81	-1.40	-78.85	4019.7	10.8638	<b>10.579</b>	-0.285
82	-1.44	-78.93	4135.9	69.0374	<b>67.2274</b>	-1.810
83	-1.48	-78.95	3675.0	59.1543	<b>57.6035</b>	-1.551
84	-1.52	-78.99	3172.2	45.8146	<b>44.6134</b>	-1.201
85	-1.56	-79.01	2913.8	81.6935	<b>79.5517</b>	-2.142
86	-1.64	-79.01	2467.0	141.4379	<b>137.7298</b>	-3.708
87	-1.69	-79.03	2369.2	110.6881	<b>107.7862</b>	-2.902
88	-1.71	-79.04	2440.5	82.5213	<b>80.3579</b>	-2.163
89	-1.78	-79.06	2545.5	67.8203	<b>66.0423</b>	-1.778
90	-1.81	-79.11	2433.5	102.0616	<b>99.3859</b>	-2.676
91	-1.82	-79.16	1854.5	117.2714	<b>114.1969</b>	-3.075
92	-1.79	-79.18	1210.3	40.6528	<b>39.587</b>	-1.066
93	-1.26	-78.61	2641.7	10.5375	<b>10.2613</b>	-0.276
94	-1.29	-78.61	2656.3	6.6875	<b>6.5122</b>	-0.175
95	-1.32	-78.60	2641.7	12.2022	<b>11.8823</b>	-0.320
96	-1.32	-78.58	2721.1	25.8947	<b>25.2158</b>	-0.679
97	-1.33	-78.55	2606.9	84.3189	<b>82.1083</b>	-2.211
98	-1.33	-78.53	2464.3	119.0114	<b>115.8912</b>	-3.120
99	-1.61	-79.00	2538.9	144.6596	<b>140.867</b>	-3.793
100	-1.68	-79.03	2477.2	96.87	<b>94.3303</b>	-2.540
101	-1.72	-79.05	2651.8	35.1229	<b>34.2021</b>	-0.921
102	-1.80	-79.06	2469.5	85.0709	<b>82.8406</b>	-2.230
103	-1.81	-79.12	2361.5	116.675	<b>113.6161</b>	-3.059
104	-1.81	-79.16	1693.9	90.6489	<b>88.2723</b>	-2.377
105	-1.28	-78.66	3012.6	19.8246	<b>19.3048</b>	-0.520
106	-1.31	-78.72	3251.6	23.2087	<b>22.6002</b>	-0.608
107	-1.34	-78.76	3621.5	54.5449	<b>53.1149</b>	-1.430
108	-1.36	-78.80	3893.8	41.3155	<b>40.2323</b>	-1.083
109	-1.38	-78.84	4080.8	28.598	<b>27.8483</b>	-0.750
110	-1.43	-78.90	4160.5	45.4167	<b>44.226</b>	-1.191
111	-1.49	-78.98	3541.6	37.5835	<b>36.5982</b>	-0.985
112	-1.53	-79.00	3081.8	56.4899	<b>55.0089</b>	-1.481
113	-1.59	-79.00	2666.8	125.4964	<b>122.2062</b>	-3.290
114	-1.67	-79.01	2514.2	115.0943	<b>112.0768</b>	-3.018
115	-1.73	-79.06	2804.6	23.7142	<b>23.0924</b>	-0.622
116	-1.75	-79.06	2704.7	43.5567	<b>42.4147</b>	-1.142
117	-1.81	-79.09	2424.8	84.7856	<b>82.5627</b>	-2.223
118	-1.82	-79.16	2153.7	144.1575	<b>140.3781</b>	-3.779
119	-1.66	-78.75	3101.6	83.2815	<b>81.0981</b>	-2.183
120	-1.62	-78.81	3348.1	92.1552	<b>89.7391</b>	-2.416
121	-1.63	-78.83	3605.2	56.7968	<b>55.3077</b>	-1.489
122	-1.61	-78.91	3183.4	109.1693	<b>106.3072</b>	-2.862

123	-1.60	-78.99	2622.5	137.4002	<b>133.798</b>	-3.602
124	-1.63	-78.79	3240.0	103.033	<b>100.3317</b>	-2.701
125	-1.62	-78.82	3473.1	72.7235	<b>70.8169</b>	-1.907
126	-1.65	-78.84	4029.5	14.1565	<b>13.7854</b>	-0.371
127	-1.60	-78.99	2697.5	136.3446	<b>132.77</b>	-3.575
128	-1.61	-79.01	2681.5	125.6494	<b>122.3552</b>	-3.294
129	-1.61	-79.04	2902.4	91.3086	<b>88.9147</b>	-2.394
130	-1.60	-79.06	3179.2	50.4477	<b>49.1251</b>	-1.323
131	-1.60	-79.08	2736.8	79.6442	<b>77.5561</b>	-2.088
132	-1.59	-79.11	2242.8	45.7917	<b>44.5911</b>	-1.201
133	-1.57	-79.15	1186.5	35.8448	<b>34.9051</b>	-0.940
134	-1.61	-79.04	3041.6	76.5088	<b>74.5029</b>	-2.006
135	-1.60	-79.06	3112.6	36.6839	<b>35.7222</b>	-0.962
136	-1.59	-79.07	2984.0	37.6709	<b>36.6833</b>	-0.988
137	-1.60	-79.09	2502.6	72.0174	<b>70.1293</b>	-1.888
138	-1.58	-79.11	1991.1	31.8371	<b>31.0024</b>	-0.835
139	-1.70	-79.04	2504.3	81.5496	<b>79.4116</b>	-2.138
140	-1.58	-79.17	853.8	56.2699	<b>54.7946</b>	-1.475
141	-1.58	-79.19	979.3	20.494	<b>19.9567</b>	-0.537
142	-1.61	-79.24	415.2	53.9535	<b>52.539</b>	-1.415
143	-1.62	-79.25	376.7	61.0766	<b>59.4754</b>	-1.601
144	-1.63	-79.27	336.3	30.731	<b>29.9254</b>	-0.806
145	-1.62	-79.33	178.8	61.2841	<b>59.6774</b>	-1.607
146	-1.59	-79.40	17.3	8.4447	<b>8.2233</b>	-0.221
147	-1.58	-79.15	1061.2	23.1985	<b>22.5903</b>	-0.608
148	-1.58	-79.21	589.3	10.6736	<b>10.3938</b>	-0.280
149	-1.58	-79.22	508.6	10.1085	<b>9.8435</b>	-0.265
150	-1.62	-79.25	364.9	54.0133	<b>52.5972</b>	-1.416
151	-1.63	-79.31	198.9	54.6095	<b>53.1778</b>	-1.432
152	-1.59	-79.42	14.0	4.073	<b>3.9662</b>	-0.107
153	-1.58	-79.46	12.9	3.7451	<b>3.647</b>	-0.098
154	-1.57	-79.50	13.5	2.6791	<b>2.6088</b>	-0.070
155	-1.58	-79.40	14.7	6.8142	<b>6.6355</b>	-0.179
156	-1.58	-79.44	12.6	3.4289	<b>3.339</b>	-0.090
157	-1.57	-79.47	14.0	2.8347	<b>2.7604</b>	-0.074
158	-1.57	-79.49	14.1	2.4211	<b>2.3576</b>	-0.063

**CT1.267 (mgal) (1) = corrección del terreno para una densidad igual a 2.67 gr/cm<sup>3</sup>**  
**CT2.6 (mgal) (2) = corrección del terreno con una densidad media del área de estudio = 2.6 gr/cm<sup>3</sup>**  
**DIF (2)-(1) = CT2.6 (mgal) (2) - CT1.267 (mgal) (1)**  
**Fuente: Departamento de Geodesia del IGM; recopilado por Kirby E.**

Dentro de los resultados estadísticos calculados en la Corrección del Terreno (CT), para el caso de la CT con una densidad de 2.67 gr/cm<sup>3</sup>, se obtuvo cómo valor medio 50.6936 mgal, desviación estándar 38.2900, cómo valor máximo 144.6596 y cómo valor mínimo 2.4211 mgal respectivamente. Los resultados estadísticos para la corrección del Terreno con una densidad media del área de estudio son: cómo valor medio 49.3645 mgal, desviación estándar 37.2862, cómo valor máximo 140.8670 cómo valor mínimo 2.3576 mgal respectivamente.

Los resultados estadísticos calculados de la diferencia entre la CT con una densidad media del área de estudio igual a 2.6 gr/cm<sup>3</sup> y la CT con una densidad igual a 2.67 gr/cm<sup>3</sup> son: cómo valor medio (media aritmética) -1.3291 mgal, desviación estándar 1.0039, cómo valor máximo de la diferencia -0.0635 y cómo valor mínimo -3.7926 mgal respectivamente.

## 4.9 RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LAS ANOMALÍAS DE BOUGUER COMPLETA

Los resultados y estadísticas del cálculo de las Anomalías de Bouguer, se los puede ver en la Tabla 4.14.

En la tabla 4.14, se puede ver que se hicieron dos tipos de cálculos en las anomalías de Bouguer completa. En los primeros cálculos se utilizó tanto para el plato de Bouguer y la Corrección una densidad constante igual a  $2.67 \text{ gr/cm}^3$ , y en los segundos cálculos lo propuesto en este estudio, para el plato de Bouguer en cada punto se utilizó una densidad media de una columna geológica a partir del MDVLD y para el cálculo de la Corrección del Terreno se utilizó una densidad media del área de estudio, también obtenida del MDVLD e igual a  $2.6 \text{ gr/cm}^3$ . En la última columna esta la diferencia de cada método utilizado en las anomalías de Bouguer completa.

**Tabla 4.14 Anomalías de Bouguer Completa**

DATOS Y CÁLCULOS INICIALES										ANOMALÍAS DE BOUGUER P=2.67 gr/cm3			ANOMALÍAS DE BOUGUER P=MDVLD			
PTO	LAT°	LONG°	Hn(m)	$\rho=$ MDVLD	CTMDVLD (4)	CAL	$\gamma$ (mgal)	g(mgal)	$\Delta gAL$ (mgal)	CB(mgal) $\rho=(1)$	$\Delta gB$ (mgal) (1)	$\Delta gBC$ (mgal) 2.67(5)	CB(mgal) $\rho=(2)$	$\Delta gB$ (mgal) (2)	$\Delta gBC$ (mgal) MDVLD(6)	DIF (6)- (5)
1	-1.82	-79.36	7.8	2.58	10.0415	2.395	978037.8	978047.9	12.542	0.8713	11.6702	21.982	0.8419	11.6996	<b>21.741</b>	-0.241
2	-1.84	-79.34	13.5	2.58	12.604	4.156	978037.9	977997.6	-36.146	1.5118	-37.6581	-24.715	1.4609	-37.6072	<b>-25.003</b>	-0.288
3	-1.78	-79.28	113.8	2.58	16.6744	35.023	978037.5	977955.5	-46.984	12.7397	-59.7235	-42.600	12.3102	-59.2941	<b>-42.620</b>	-0.019
4	-1.77	-79.23	403.1	2.58	14.223	124.033	978037.5	977887.7	-25.739	45.1207	-70.8601	-56.254	43.5998	-69.3392	<b>-55.116</b>	1.138
5	-1.86	-79.39	12.0	2.58	8.5945	3.688	978038.0	978021.1	-13.201	1.3414	-14.5419	-5.716	1.2962	-14.4967	<b>-5.902</b>	-0.186
6	-1.80	-79.30	36.7	2.58	18.3686	11.293	978037.6	977981.4	-44.954	4.1079	-49.0618	-30.199	3.9695	-48.9234	<b>-30.555</b>	-0.356
7	-1.77	-79.24	306.8	2.58	6.4435	94.406	978037.5	977911.1	-31.970	34.3423	-66.3122	-59.695	33.1847	-65.1546	<b>-58.711</b>	0.984
8	-1.77	-79.18	790.6	2.58	14.5774	243.248	978037.4	977779.7	-14.454	88.4965	-102.9505	-87.981	85.5134	-99.9675	<b>-85.390</b>	2.591
9	-1.80	-79.48	6.9	2.58	7.573	2.121	978037.7	978054.3	18.788	0.7715	18.0167	25.794	0.7455	18.0427	<b>25.616</b>	-0.178
10	-1.85	-79.41	10.7	2.58	8.948	3.293	978037.9	978032.6	-1.981	1.1979	-3.1792	6.010	1.1575	-3.1389	<b>5.809</b>	-0.201
11	-1.82	-79.32	18.8	2.58	16.7053	5.791	978037.8	977986.9	-45.106	2.1064	-47.2125	-30.057	2.0354	-47.1415	<b>-30.436</b>	-0.379
12	-1.77	-79.27	172.1	2.58	14.4005	52.947	978037.4	977939.5	-45.039	19.2599	-64.2985	-49.510	18.6107	-63.6493	<b>-49.249</b>	0.262
13	-1.84	-79.44	12.3	2.58	7.7535	3.784	978037.8	978042.4	8.315	1.3765	6.9385	14.901	1.3301	6.9849	<b>14.738</b>	-0.162
14	-1.86	-79.36	10.6	2.58	8.2293	3.268	978038.0	978009.7	-25.022	1.1886	-26.2111	-17.760	1.1485	-26.1710	<b>-17.942</b>	-0.182
15	-1.79	-79.29	54.7	2.58	20.2289	16.816	978037.6	977973.0	-47.786	6.1170	-53.9027	-33.129	5.9108	-53.6965	<b>-33.468</b>	-0.338
16	-1.77	-79.19	621.1	2.58	11.2863	191.096	978037.5	977825.8	-20.555	69.5202	-90.0755	-78.485	67.1768	-87.7322	<b>-76.446</b>	2.039
17	-1.98	-78.73	3140.4	2.75	35.5694	965.654	978038.7	977234.5	161.413	351.5104	-190.0971	-153.570	362.0426	-200.6293	<b>-165.060</b>	-11.490
18	-1.90	-78.72	3187.7	2.62	39.6588	980.185	978038.2	977213.4	155.368	356.8039	-201.4364	-160.710	350.1222	-194.7546	<b>-155.096</b>	5.614
19	-1.83	-78.74	3205.1	2.62	71.2638	985.514	978037.8	977188.8	136.539	358.7452	-222.2062	-149.024	352.0271	-215.4882	<b>-144.224</b>	4.799
20	-1.71	-78.77	3212.9	2.62	21.235	987.904	978037.1	977189.2	139.951	359.6160	-219.6649	-197.858	352.8816	-212.9305	<b>-191.696</b>	6.163
21	-1.93	-78.71	3140.5	2.62	11.5118	965.658	978038.4	977226.5	153.765	351.5121	-197.7467	-185.925	344.9295	-191.1640	<b>-179.652</b>	6.273
22	-1.80	-78.74	3247.0	2.62	52.9424	998.394	978037.6	977179.3	140.037	363.4374	-223.4006	-169.033	356.6314	-216.5947	<b>-163.652</b>	5.381
23	-1.69	-78.77	3204.6	2.62	33.1262	985.374	978037.0	977190.7	139.040	358.6942	-219.6545	-185.636	351.9771	-212.9374	<b>-179.811</b>	5.825
24	-1.65	-78.70	2902.7	2.62	67.9612	892.611	978036.8	977267.6	123.408	324.9040	-201.4956	-131.705	318.8196	-195.4112	<b>-127.450</b>	4.255
25	-1.96	-78.72	3101.4	2.75	36.1805	953.659	978038.6	977242.0	157.122	347.1409	-190.0188	-152.864	357.5421	-200.4200	<b>-164.240</b>	-11.375
26	-1.87	-78.73	3157.8	2.62	83.396	971.001	978038.1	977206.5	139.424	353.4585	-214.0347	-128.393	346.8394	-207.4156	<b>-124.020</b>	4.374
27	-1.74	-78.76	3309.6	2.62	35.5348	1017.623	978037.3	977165.6	145.930	370.4424	-224.5120	-188.020	363.5053	-217.5749	<b>-182.040</b>	5.980
28	-1.65	-78.75	3095.5	2.62	89.5908	951.844	978036.8	977209.7	124.692	346.4800	-221.7884	-129.785	339.9916	-215.3000	<b>-125.709</b>	4.076
29	-1.66	-78.68	2804.0	2.62	53.2751	862.267	978036.9	977289.3	114.655	313.8516	-199.1965	-144.487	307.9743	-193.3191	<b>-140.044</b>	4.443
30	-1.93	-78.71	3064.4	2.62	21.2023	942.276	978038.4	977243.1	146.924	342.9943	-196.0705	-174.297	336.5712	-189.6474	<b>-168.445</b>	5.852
31	-1.77	-78.75	3305.5	2.62	41.2808	1016.363	978037.4	977167.8	146.677	369.9837	-223.3065	-180.914	363.0552	-216.3779	<b>-175.097</b>	5.817

32	-1.49	-78.73	3042.4	2.62	53.6383	935.532	978036.0	977231.9	131.471	340.5379	-209.0670	-153.984	334.1608	-202.6898	<b>-149.052</b>	4.933
33	-1.59	-78.70	3004.4	2.62	87.3883	923.851	978036.5	977223.5	110.834	336.2830	-225.4489	-135.708	329.9856	-219.1514	<b>-131.763</b>	3.945
34	-1.51	-78.71	3495.3	2.62	18.5153	1074.670	978036.1	977103.4	141.982	391.2264	-249.2442	-230.230	383.9001	-241.9178	<b>-223.403</b>	6.828
35	-1.44	-78.67	3357.0	2.62	18.1953	1032.184	978035.8	977134.7	131.055	375.7475	-244.6925	-226.007	368.7110	-237.6560	<b>-219.461</b>	6.547
36	-1.38	-78.65	3189.2	2.62	42.0943	980.619	978035.5	977173.2	118.264	356.9621	-238.6984	-195.471	350.2774	-232.0137	<b>-189.919</b>	5.551
37	-1.32	-78.64	2906.3	2.62	20.9547	893.716	978035.3	977219.7	78.122	325.3063	-247.1845	-225.666	319.2145	-241.0926	<b>-220.138</b>	5.528
38	-1.23	-78.61	2470.2	2.62	51.6248	759.669	978034.9	977303.7	28.435	276.4860	-248.0514	-195.037	271.3084	-242.8738	<b>-191.249</b>	3.788
39	-1.22	-78.59	2580.7	2.62	38.4334	793.649	978034.9	977288.7	47.479	288.8604	-241.3817	-201.914	283.4511	-235.9723	<b>-197.539</b>	4.375
40	-1.14	-78.59	2673.5	2.62	69.4696	822.173	978034.6	977262.7	50.280	299.2489	-248.9690	-177.629	293.6450	-243.3651	<b>-173.895</b>	3.734
41	-1.62	-78.68	2907.4	2.62	69.7363	894.033	978036.7	977262.6	119.932	325.4219	-205.4899	-133.876	319.3278	-199.3958	<b>-129.660</b>	4.217
42	-1.54	-78.73	3330.9	2.62	55.1992	1024.157	978036.2	977133.7	121.565	372.8228	-251.2575	-194.572	365.8411	-244.2758	<b>-189.077</b>	5.496
43	-1.49	-78.70	3602.4	2.62	8.3645	1107.577	978036.0	977082.0	153.555	403.2161	-249.6615	-241.072	395.6653	-242.1107	<b>-233.746</b>	7.326
44	-1.43	-78.66	3166.4	2.62	8.9103	973.616	978035.7	977178.7	116.596	354.4111	-237.8150	-228.665	347.7742	-231.1781	<b>-222.268</b>	6.397
45	-1.39	-78.65	3201.3	2.62	45.9022	984.338	978035.6	977171.5	120.285	358.3168	-238.0319	-190.894	351.6067	-231.3218	<b>-185.420</b>	5.474
46	-1.38	-78.65	3076.9	2.62	30.2103	946.144	978035.5	977189.4	100.048	344.4033	-244.3552	-213.332	337.9538	-237.9057	<b>-207.695</b>	5.636
47	-1.29	-78.63	2790.8	2.62	11.5386	858.207	978035.2	977239.8	62.880	312.3729	-249.4929	-237.644	306.5233	-243.6432	<b>-232.105</b>	5.539
48	-1.24	-78.63	2575.9	2.62	38.7291	792.171	978035.0	977278.7	35.880	288.3222	-252.4417	-212.670	282.9229	-247.0424	<b>-208.313</b>	4.357
49	-1.08	-78.59	2663.7	2.62	100.8148	819.138	978034.4	977254.1	38.879	298.1434	-259.2648	-155.736	292.5602	-253.6816	<b>-152.867</b>	2.869
50	-1.03	-78.59	2655.1	2.62	130.7153	816.494	978034.2	977247.2	29.500	297.1806	-267.6810	-133.446	291.6155	-262.1158	<b>-131.400</b>	2.046
51	-1.67	-78.66	2769.2	2.62	40.579	851.580	978036.9	977292.1	106.745	309.9593	-203.2142	-161.543	304.1548	-197.4097	<b>-156.831</b>	4.712
52	-1.56	-78.73	3164.8	2.62	82.1006	973.129	978036.4	977172.6	109.367	354.2334	-244.8668	-160.556	347.5998	-238.2332	<b>-156.133</b>	4.423
53	-1.46	-78.69	3523.6	2.62	10.9442	1083.366	978035.9	977098.9	146.340	394.3945	-248.0547	-236.816	387.0088	-240.6691	<b>-229.725</b>	7.091
54	-1.42	-78.65	3194.5	2.62	30.0457	982.272	978035.7	977172.5	119.070	357.5641	-238.4945	-207.640	350.8681	-231.7985	<b>-201.753</b>	5.887
55	-1.34	-78.65	3014.4	2.62	28.1472	926.916	978035.4	977200.1	91.610	337.3994	-245.7893	-216.884	331.0811	-239.4710	<b>-211.324</b>	5.561
56	-1.27	-78.63	2744.0	2.62	10.2993	843.842	978035.1	977245.1	53.897	307.1408	-253.2433	-242.667	301.3891	-247.4916	<b>-237.192</b>	5.474
57	-1.18	-78.59	2692.0	2.62	39.3268	827.859	978034.7	977263.3	56.378	301.3196	-244.9416	-204.556	295.6769	-239.2989	<b>-199.972</b>	4.584
58	-1.11	-78.59	2701.3	2.62	65.297	830.715	978034.5	977251.7	47.942	302.3600	-254.4177	-187.363	296.6978	-248.7555	<b>-183.459</b>	3.904
59	-1.28	-78.65	2964.2	2.62	25.0894	911.484	978035.1	977198.9	75.259	331.7782	-256.5188	-230.754	325.5651	-250.3057	<b>-225.216</b>	5.538
60	-1.31	-78.70	3161.2	2.62	14.2473	972.032	978035.2	977159.6	96.363	353.8339	-257.4710	-242.840	347.2078	-250.8449	<b>-236.598</b>	6.243
61	-1.32	-78.75	3574.5	2.62	44.8624	1099.010	978035.3	977079.9	143.668	400.0944	-256.4263	-210.356	392.6020	-248.9339	<b>-204.072</b>	6.285
62	-1.32	-78.78	3717.9	2.62	46.3257	1143.048	978035.3	977062.3	170.086	416.1406	-246.0548	-198.482	408.3477	-238.2619	<b>-191.936</b>	6.546
63	-1.37	-78.82	4039.6	2.62	45.672	1241.866	978035.5	977013.9	220.264	452.1507	-231.8870	-184.985	443.6834	-223.4197	<b>-177.748</b>	7.238
64	-1.42	-78.87	4028.1	2.62	28.4822	1238.332	978035.7	977050.4	253.063	450.8628	-197.7998	-168.551	442.4197	-189.3567	<b>-160.875</b>	7.676
65	-1.46	-78.94	4027.3	2.62	86.1689	1238.089	978035.9	977027.2	229.345	450.7741	-221.4296	-132.941	442.3327	-212.9881	<b>-126.819</b>	6.121
66	-1.50	-78.99	3492.9	2.62	18.5177	1073.940	978036.1	977146.6	184.500	390.9603	-206.4605	-187.444	383.6390	-199.1391	<b>-180.621</b>	6.823
67	-1.58	-79.00	2796.1	2.62	107.4881	859.840	978036.5	977309.8	133.153	312.9675	-179.8149	-69.433	307.1067	-173.9540	<b>-66.466</b>	2.967
68	-1.62	-79.01	2576.1	2.62	137.2655	792.241	978036.7	977357.9	113.433	288.3478	-174.9153	-33.954	282.9480	-169.5155	<b>-32.250</b>	1.704
69	-1.71	-79.03	2437.3	2.58	91.1581	749.579	978037.1	977401.8	114.301	272.8113	-158.5100	-64.898	263.6154	-149.3141	<b>-58.156</b>	6.742

70	-1.74	-79.06	2878.6	2.58	24.7259	885.197	978037.3	977324.0	171.926	322.2032	-150.2777	-124.886	311.3424	-139.4169	<b>-114.691</b>	10.195
71	-1.81	-79.07	2329.5	2.58	82.9352	716.428	978037.7	977451.2	129.879	260.7393	-130.8598	-45.692	251.9504	-122.0709	<b>-39.136</b>	6.556
72	-1.83	-79.14	2220.4	2.58	139.5219	682.894	978037.8	977501.3	146.386	248.5286	-102.1427	41.136	240.1513	-93.7653	<b>45.757</b>	4.621
73	-1.79	-79.17	1529.4	2.58	74.039	470.449	978037.6	977642.3	75.134	171.1849	-96.0505	-20.018	165.4146	-90.2802	<b>-16.241</b>	3.777
74	-1.78	-79.17	225.2	2.58	86.1537	69.288	978037.5	977740.9	227.362	25.2044	-252.5662	-164.093	24.3548	-251.7166	<b>-165.563</b>	-1.470
75	-1.28	-78.64	2803.8	2.62	16.9025	862.205	978035.1	977233.1	60.152	313.8290	-253.6772	-236.320	307.9521	-247.8002	<b>-230.898</b>	5.422
76	-1.30	-78.69	3093.4	2.62	17.1346	951.198	978035.2	977173.1	89.161	346.2447	-257.0837	-239.488	339.7607	-250.5998	<b>-233.465</b>	6.023
77	-1.31	-78.74	3420.5	2.62	5.8057	1051.694	978035.2	977109.7	126.194	382.8555	-256.6618	-250.700	375.6859	-249.4922	<b>-243.686</b>	7.013
78	-1.33	-78.77	3604.6	2.62	39.9147	1108.255	978035.3	977079.6	152.513	403.4630	-250.9504	-209.961	395.9076	-243.3949	<b>-203.480</b>	6.481
79	-1.34	-78.80	3799.7	2.62	17.4563	1168.199	978035.3	977053.8	186.660	425.3052	-238.6448	-220.718	417.3407	-230.6802	<b>-213.224</b>	7.495
80	-1.35	-78.81	4000.7	2.62	32.4893	1229.923	978035.4	977016.9	211.392	447.7981	-236.4064	-203.042	439.4124	-228.0207	<b>-195.531</b>	7.511
81	-1.40	-78.85	4019.7	2.62	10.579	1235.749	978035.6	977040.9	241.033	449.9215	-208.8889	-198.025	441.4960	-200.4634	<b>-189.884</b>	8.141
82	-1.44	-78.93	4135.9	2.62	67.2274	1271.452	978035.8	977010.9	246.583	462.9330	-216.3503	-147.313	454.2638	-207.6811	<b>-140.454</b>	6.859
83	-1.48	-78.95	3674.9	2.62	57.6035	1129.866	978036.0	977101.6	195.453	411.3373	-215.8847	-156.730	403.6344	-208.1818	<b>-150.578</b>	6.152
84	-1.52	-78.99	3172.2	2.62	44.6134	975.424	978036.2	977220.0	159.241	355.0696	-195.8286	-150.014	348.4203	-189.1794	<b>-144.566</b>	5.448
85	-1.56	-79.01	2913.8	2.62	79.5517	896.019	978036.4	977285.5	145.162	326.1452	-180.9831	-99.290	320.0376	-174.8755	<b>-95.324</b>	3.966
86	-1.64	-79.01	2467.0	2.58	137.7298	758.694	978036.8	977377.1	99.053	276.1307	-177.0781	-35.640	266.8229	-167.7703	<b>-30.041</b>	5.600
87	-1.69	-79.03	2369.2	2.58	107.7862	728.630	978037.0	977411.8	103.339	265.1827	-161.8434	-51.155	256.2440	-152.9046	<b>-45.118</b>	6.037
88	-1.71	-79.04	2440.5	2.58	80.3579	750.546	978037.1	977401.8	115.203	273.1635	-157.9600	-75.439	263.9557	-148.7523	<b>-68.394</b>	7.044
89	-1.78	-79.06	2545.5	2.58	66.0423	782.818	978037.5	977399.1	144.426	284.9161	-140.4899	-72.670	275.3122	-130.8860	<b>-64.844</b>	7.826
90	-1.81	-79.11	2433.5	2.58	99.3859	748.406	978037.7	977443.6	154.345	272.3842	-118.0392	-15.978	263.2027	-108.8577	<b>-9.472</b>	6.506
91	-1.82	-79.16	1854.5	2.58	114.1969	570.412	978037.7	977581.6	114.256	207.5746	-93.3185	23.953	200.5777	-86.3217	<b>27.875</b>	3.922
92	-1.79	-79.18	1210.3	2.58	39.587	372.321	978037.6	977713.0	47.741	135.4684	-87.7275	-47.075	130.9021	-83.1612	<b>-43.574</b>	3.501
93	-1.26	-78.61	2641.7	2.62	10.2613	812.375	978035.0	977268.3	45.674	295.6804	-250.0066	-239.469	290.1434	-244.4695	<b>-234.208</b>	5.261
94	-1.29	-78.61	2656.3	2.62	6.5122	816.873	978035.1	977273.9	55.641	297.3187	-241.6778	-234.990	291.7509	-236.1100	<b>-229.598</b>	5.392
95	-1.32	-78.60	2641.6	2.62	11.8823	812.375	978035.3	977284.9	62.017	295.6802	-233.6631	-221.461	290.1431	-228.1260	<b>-216.244</b>	5.217
96	-1.32	-78.58	2721.1	2.62	25.2158	836.799	978035.3	977278.0	79.492	304.5755	-225.0839	-199.189	298.8719	-219.3802	<b>-194.164</b>	5.025
97	-1.33	-78.55	2606.9	2.62	82.1083	801.697	978035.3	977307.3	73.692	291.7917	-218.0995	-133.781	286.3274	-212.6352	<b>-130.527</b>	3.254
98	-1.33	-78.53	2464.3	2.62	115.8912	757.875	978035.3	977339.3	61.808	275.8324	-214.0241	-95.013	270.6670	-208.8587	<b>-92.967</b>	2.045
99	-1.61	-79.00	2538.9	2.62	140.867	780.807	978036.6	977366.0	110.174	284.1838	-174.0101	-29.350	278.8620	-168.6883	<b>-27.821</b>	1.529
100	-1.68	-79.03	2477.2	2.58	94.3303	761.839	978037.0	977387.5	112.332	277.2762	-164.9438	-68.074	267.9298	-155.5974	<b>-61.267</b>	6.807
101	-1.72	-79.05	2651.8	2.58	34.2021	815.487	978037.2	977366.6	144.939	296.8137	-151.8749	-116.752	286.8088	-141.8700	<b>-107.668</b>	9.084
102	-1.80	-79.06	2469.5	2.58	82.8406	759.473	978037.6	977415.9	137.807	276.4145	-138.6072	-53.536	267.0971	-129.2899	<b>-46.449</b>	7.087
103	-1.81	-79.12	2361.5	2.58	113.6161	726.267	978037.7	977457.7	146.247	264.3224	-118.0753	-1.400	255.4127	-109.1655	<b>4.451</b>	5.851
104	-1.81	-79.16	1693.8	2.58	88.2723	521.017	978037.7	977610.2	93.514	189.5927	-96.0788	-5.430	183.2019	-89.6880	<b>-1.416</b>	4.014
105	-1.28	-78.66	3012.6	2.62	19.3048	926.362	978035.1	977189.0	80.192	337.1977	-257.0055	-237.181	330.8831	-250.6909	<b>-231.386</b>	5.795
106	-1.31	-78.72	3251.6	2.62	22.6002	999.811	978035.2	977141.9	106.512	363.9535	-257.4412	-234.232	357.1379	-250.6256	<b>-228.025</b>	6.207
107	-1.34	-78.76	3621.5	2.62	53.1149	1113.449	978035.3	977073.5	151.647	405.3557	-253.7082	-199.163	397.7647	-246.1173	<b>-193.002</b>	6.161



108	-1.36	-78.80	3893.8	2.62	40.2323	1197.094	978035.4	977034.6	196.235	435.8348	-239.5993	-198.284	427.6731	-231.4376	<b>-191.205</b>	7.079
109	-1.38	-78.84	4080.8	2.62	27.8483	1254.518	978035.5	977021.1	240.090	456.7615	-216.6715	-188.074	448.2079	-208.1179	<b>-180.270</b>	7.804
110	-1.43	-78.90	4160.5	2.62	44.226	1279.015	978035.8	977022.4	265.633	465.6895	-200.0569	-154.640	456.9687	-191.3361	<b>-147.110</b>	7.530
111	-1.49	-78.98	3541.6	2.62	36.5982	1088.903	978036.0	977130.5	183.371	396.4121	-213.0416	-175.458	388.9887	-205.6182	<b>-169.020</b>	6.438
112	-1.53	-79.00	3081.8	2.62	55.0089	947.645	978036.2	977242.9	154.314	344.9504	-190.6367	-134.147	338.4907	-184.1770	<b>-129.168</b>	4.979
113	-1.59	-79.00	2666.8	2.62	122.2062	820.102	978036.5	977338.0	121.601	298.4947	-176.8935	-51.397	292.9049	-171.3037	<b>-49.097</b>	2.300
114	-1.67	-79.01	2514.2	2.58	112.0768	773.204	978036.9	977368.7	105.025	281.4147	-176.3895	-61.295	271.9288	-166.9036	<b>-54.827</b>	6.468
115	-1.73	-79.06	2804.6	2.58	23.0924	862.457	978037.2	977338.1	163.326	313.9206	-150.5943	-126.880	303.3390	-140.0127	<b>-116.920</b>	9.960
116	-1.75	-79.06	2704.7	2.58	42.4147	831.743	978037.4	977364.6	159.003	302.7344	-143.7311	-100.174	292.5299	-133.5266	<b>-91.112</b>	9.063
117	-1.81	-79.09	2424.8	2.58	82.5627	745.738	978037.7	977439.9	147.942	271.4126	-123.4703	-38.685	262.2639	-114.3216	<b>-31.759</b>	6.926
118	-1.82	-79.16	2153.7	2.58	140.3781	662.398	978037.8	977517.4	142.037	241.0655	-99.0285	45.129	232.9397	-90.9027	<b>49.475</b>	4.346
119	-1.66	-78.75	3101.6	2.62	81.0981	953.707	978036.8	977210.8	127.615	347.1584	-219.5434	-136.262	340.6573	-213.0423	<b>-131.944</b>	4.318
120	-1.62	-78.81	3348.1	2.62	89.7391	1029.457	978036.6	977143.2	136.032	374.7539	-238.7214	-146.566	367.7360	-231.7036	<b>-141.964</b>	4.602
121	-1.63	-78.83	3605.2	2.62	55.3077	1108.445	978036.7	977101.7	173.434	403.5322	-230.0985	-173.302	395.9754	-222.5417	<b>-167.234</b>	6.068
122	-1.61	-78.91	3183.4	2.62	106.3072	978.860	978036.6	977208.2	150.483	356.3212	-205.8378	-96.669	349.6485	-199.1652	<b>-92.858</b>	3.811
123	-1.60	-78.99	2622.4	2.62	133.798	806.473	978036.5	977343.1	113.008	293.5309	-180.5230	-43.123	288.0341	-175.0262	<b>-41.228</b>	1.895
124	-1.63	-78.79	3240.0	2.62	100.3317	996.238	978036.7	977165.8	125.317	362.6521	-237.3349	-134.302	355.8608	-230.5436	<b>-130.212</b>	4.090
125	-1.62	-78.82	3473.1	2.62	70.8169	1067.868	978036.7	977122.2	153.351	388.7479	-235.3974	-162.674	381.4680	-228.1175	<b>-157.301</b>	5.373
126	-1.65	-78.84	4029.5	2.62	13.7854	1238.772	978036.8	977032.1	234.039	451.0231	-216.9837	-202.827	442.5769	-208.5376	<b>-194.752</b>	8.075
127	-1.60	-78.99	2697.4	2.62	132.77	829.523	978036.6	977323.3	116.200	301.9258	-185.7253	-49.381	296.2718	-180.0713	<b>-47.301</b>	2.079
128	-1.61	-79.01	2681.5	2.62	122.3552	824.633	978036.6	977339.7	127.711	300.1447	-172.4337	-46.784	294.5240	-166.8130	<b>-44.458</b>	2.326
129	-1.61	-79.04	2902.4	2.58	88.9147	892.495	978036.6	977304.0	159.815	324.8615	-165.0470	-73.738	313.9112	-154.0966	<b>-65.182</b>	8.556
130	-1.60	-79.06	3179.2	2.58	49.1251	977.561	978036.6	977246.7	187.715	355.8481	-168.1330	-117.685	343.8532	-156.1382	<b>-107.013</b>	10.672
131	-1.60	-79.08	2736.8	2.58	77.5561	841.626	978036.6	977332.0	137.081	306.3337	-169.2524	-89.608	296.0079	-158.9265	<b>-81.370</b>	8.238
132	-1.59	-79.11	2242.8	2.58	44.5911	689.795	978036.5	977434.9	88.156	251.0416	-162.8855	-117.094	242.5795	-154.4234	<b>-109.832</b>	7.261
133	-1.57	-79.15	1186.4	2.58	34.9051	364.987	978036.4	977662.7	-8.762	132.7990	-141.5607	-105.716	128.3226	-137.0844	<b>-102.179</b>	3.537
134	-1.61	-79.04	3041.6	2.58	74.5029	935.286	978036.6	977273.6	172.263	340.4484	-168.1856	-91.677	328.9726	-156.7098	<b>-82.207</b>	9.470
135	-1.60	-79.06	3112.6	2.58	35.7222	957.090	978036.5	977258.9	179.463	348.3907	-168.9275	-132.244	336.6472	-157.1840	<b>-121.462</b>	10.782
136	-1.59	-79.07	2984.0	2.58	36.6833	917.587	978036.5	977287.3	168.398	334.0014	-165.6038	-127.933	322.7429	-154.3453	<b>-117.662</b>	10.271
137	-1.60	-79.09	2502.6	2.58	70.1293	769.651	978036.5	977383.3	116.412	280.1211	-163.7090	-91.692	270.6789	-154.2667	<b>-84.137</b>	7.554
138	-1.58	-79.11	1991.1	2.58	31.0024	612.402	978036.5	977489.3	65.252	222.8621	-157.6101	-125.773	215.3499	-150.0979	<b>-119.095</b>	6.678
139	-1.70	-79.04	2504.3	2.58	79.4116	770.146	978037.1	977389.9	122.966	280.3012	-157.3357	-75.786	270.8529	-147.8873	<b>-68.476</b>	7.310
140	-1.58	-79.17	853.7	2.58	54.7946	262.659	978036.4	977735.4	-38.352	95.5600	-133.9119	-77.642	92.3389	-130.6908	<b>-75.896</b>	1.746
141	-1.58	-79.19	979.3	2.58	19.9567	301.275	978036.4	977723.5	-11.649	109.6124	-121.2611	-100.767	105.9176	-117.5663	<b>-97.610</b>	3.158
142	-1.61	-79.24	415.2	2.58	52.539	127.759	978036.6	977848.7	-60.165	46.4762	-106.6413	-52.688	44.9096	-105.0747	<b>-52.536</b>	0.152
143	-1.62	-79.25	376.7	2.58	59.4754	115.905	978036.6	977860.4	-60.379	42.1636	-102.5431	-41.467	40.7424	-101.1219	<b>-41.646</b>	-0.180
144	-1.63	-79.27	336.3	2.58	29.9254	103.487	978036.7	977881.2	-52.017	37.6459	-89.6627	-58.932	36.3770	-88.3937	<b>-58.468</b>	0.463
145	-1.62	-79.33	178.8	2.58	59.6774	55.029	978036.7	977931.9	-49.744	20.0173	-69.7613	-8.477	19.3425	-69.0865	<b>-9.409</b>	-0.932

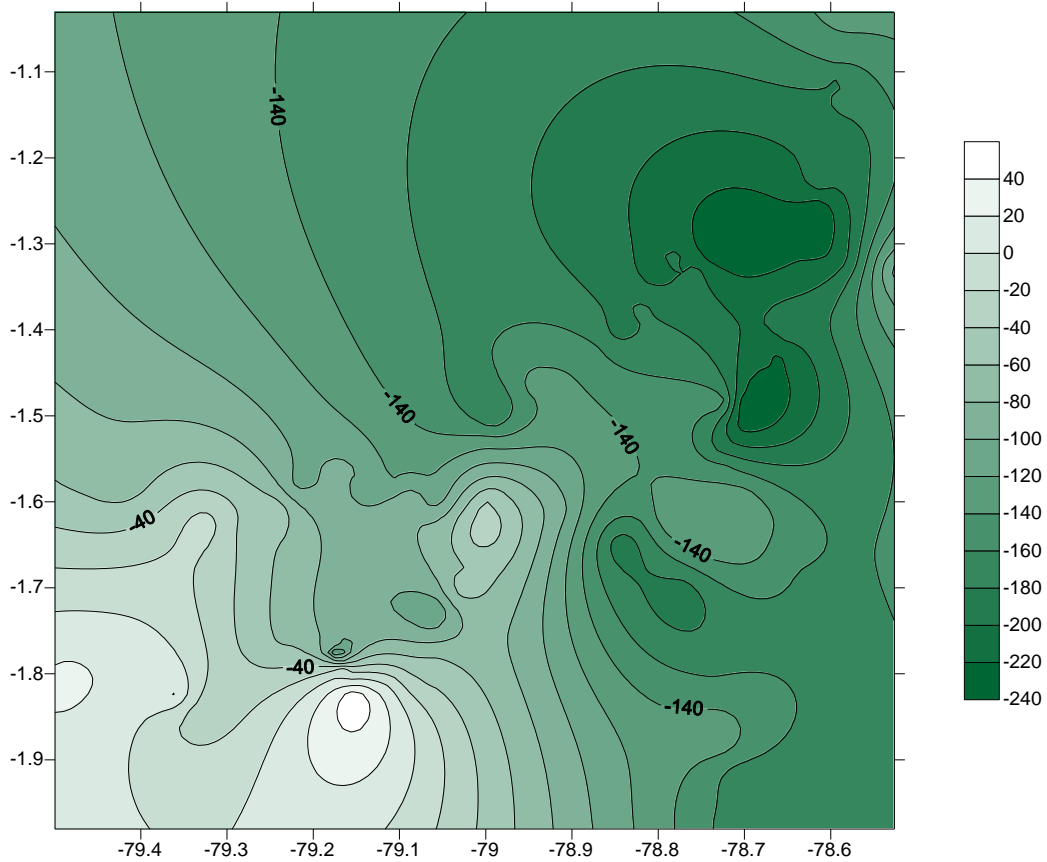
146	-1.59	-79.40	17.3	2.58	8.2233	5.315	978036.5	977966.3	-64.896	1.9335	-66.8295	-58.385	1.8683	-66.7643	<b>-58.541</b>	-0.156
147	-1.58	-79.15	1061.2	2.58	22.5903	326.479	978036.5	977691.7	-18.302	118.7846	-137.0861	-113.888	114.7806	-133.0821	<b>-110.492</b>	3.396
148	-1.58	-79.21	589.3	2.58	10.3938	181.310	978036.5	977803.7	-51.450	65.9597	-117.4101	-106.736	63.7363	-115.1867	<b>-104.793</b>	1.944
149	-1.58	-79.22	508.6	2.58	9.8435	156.488	978036.5	977821.1	-58.857	56.9287	-115.7860	-105.677	55.0097	-113.8670	<b>-104.024</b>	1.654
150	-1.62	-79.25	364.9	2.58	52.5972	112.279	978036.7	977866.0	-58.423	40.8443	-99.2670	-45.254	39.4676	-97.8902	<b>-45.293</b>	-0.039
151	-1.63	-79.31	198.9	2.58	53.1778	61.207	978036.7	977924.7	-50.818	22.2649	-73.0831	-18.474	21.5144	-72.3326	<b>-19.155</b>	-0.681
152	-1.59	-79.42	14.0	2.58	3.9662	4.294	978036.5	977961.8	-70.420	1.5621	-71.9824	-67.909	1.5094	-71.9298	<b>-67.964</b>	-0.054
153	-1.58	-79.46	12.9	2.58	3.647	3.956	978036.4	977964.5	-68.006	1.4391	-69.4451	-65.700	1.3906	-69.3966	<b>-65.750</b>	-0.050
154	-1.57	-79.50	13.5	2.58	2.6088	4.158	978036.4	977969.0	-63.284	1.5126	-64.7971	-62.118	1.4616	-64.7461	<b>-62.137</b>	-0.019
155	-1.58	-79.40	14.7	2.58	6.6355	4.512	978036.5	977963.4	-68.540	1.6412	-70.1816	-63.367	1.5859	-70.1262	<b>-63.491</b>	-0.123
156	-1.58	-79.44	12.6	2.58	3.339	3.868	978036.5	977963.4	-69.250	1.4070	-70.6572	-67.228	1.3595	-70.6098	<b>-67.271</b>	-0.042
157	-1.57	-79.47	14.0	2.58	2.7604	4.300	978036.4	977964.7	-67.416	1.5642	-68.9801	-66.145	1.5115	-68.9274	<b>-66.167</b>	-0.022
158	-1.57	-79.49	14.1	2.58	2.3576	4.328	978036.4	977967.1	-64.971	1.5743	-66.5456	-64.125	1.5212	-66.4926	<b>-64.135</b>	-0.010

ESTADÍSTICAS	$p=$ MDVLD	CTMDVLD (4)	CAL	$\gamma$ (mgal)	g(mgal)	$\Delta g$ AL (mgal)	CB(mgal) $\rho=1$	$\Delta g$ B(mgal) 1	$\Delta g$ BC(mgal) 2.67(5)	CB(mgal) $\rho=2$	$\Delta g$ B(mgal) 2	$\Delta g$ BC(mgal) MDVLD(6)	DIF (6)- (5)
Media Aritmética	2.6042	49.3645	720.680	978036.5	977404.4	88.5736	262.3289	-173.7553	-123.061713	256.6961	-168.1226	<b>-118.758017</b>	4.303696
Desviación Estándar (muestra)	0.0258	37.2862	386.532	1.0	309.8	87.7121	140.7195	71.6290	75.735136	138.2662	69.8981	<b>74.386562</b>	3.370041
Max	2.7500	140.8670	1279.015	978038.7	978054.3	265.6326	465.6895	18.0167	45.128985	456.9687	18.0427	<b>49.475387</b>	10.781807
Min	2.5800	2.3576	2.121	978034.2	977010.9	227.3618	0.7715	-267.6810	-250.699771	0.7455	-262.1158	<b>-243.686493</b>	-11.489848

*Lat° = Latitud en grados decimales; Long° = Longitud en grados decimales; Hn= Altura nivelada geoméricamente; p=MDVLD =densidad para c/punto obtenida del MDVLD; CTMDVLD (4) =Corrección del terreno con una densidad media del área de estudio igual a 2.6 gr/cm<sup>3</sup>;  $\gamma$ (mgal) = gravedad normal en mgal; g(mgal) = gravedad observada en mgal;  $\Delta g$ AL(mgal)= Anomalia de Aire Libre en mgal; CB (mgal)  $\rho=1$  = corrección del plato de Bouguer con una densidad constante igual a 2.67 gr/cm<sup>3</sup>;  $\Delta g$ B(mgal)1=Anomalia de Bouguer simple con densidad igual a 2.67 gr/cm<sup>3</sup>;  $\Delta g$ BC(mgal)2.67(5) = anomalia de Bouguer completa con densidad 2.67 gr/cm<sup>3</sup>. CB (mgal)  $\rho=2$  = corrección del plato de Bouguer con una densidad media para cada punto obtenida del MDVLD;  $\Delta g$ B(mgal) (2)= Anomalías de Bouguer Simple en unidades miligales (mgal calculadas con el MDVLD);  $\Delta g$ BC(mgal)= Anomalías de Bouguer COMPLETA en mgal con los valores del MDVLD y densidad igual a 2.6 gr/cm<sup>3</sup>; Dif 6 – 5 = es la diferencia de las anomalías de Bouguer completa propuesta en este estudio vs. Las anomalías de Bouguer completa calculadas con 2.67 gr/cm<sup>3</sup> como valor de densidad constante (2), (4), (6)=son subíndices que indican que son los datos calculados con la ayuda del MDVLD (1), (5) =son los subíndices que indican que los datos fueron calculados con una densidad de 2.67gr/cm<sup>3</sup> Fuente: Tierra A., 2003; Departamento de Geodesia del IGM; Recopilado por: Kirby E. Nota: los valores de la latitud, longitud, Hn y gravedad observada están truncados debido a los compromiso de confidencialidad de datos*

Los datos de la CT propuesta en este estudio están representados la figura 4.4

Figura 4.4 Mapa de Anomalías de Bouguer Completa



## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 2.12. CONCLUSIONES

2.12.1. Se ha logrado en este estudio cumplir con los objetivos y metas planteados en el capítulo I.

2.12.2. Revisando las coordenadas geodésicas, alturas geométricas y trigonométricas de la base de datos “Elenco de coordenadas de los puntos Red GPS del Ecuador (RGPSE)” y de la base de datos que contiene las Monografías de los puntos de Control Horizontal y Vertical en el sistema de referencia PSAD56 “RPSAD56E”, de un total de puntos de 3354 entre las dos bases entregados, 2755 fueron los puntos que cumplieron con los requisitos necesarios en este estudio.

2.12.3. Analizando el SRTM en el Ecuador Continental, se han encontrado áreas vacías sin información, las mismas que tienen mayor presencia en la zona de la Cordillera de los Andes. En las líneas de la costa, los valores de altura captados por el SRTM no están bien definidos; en las zonas de uso para camaroneras se han encontrado valores de -2 a -20 metros y menores. En las zonas costaneras de suelo desnudo, también se han visto valores de -2 -4 metros. En el sector en donde geográficamente se encuentra la Isla Santay (Provincia del Guayas), no existe información del SRTM, es decir que toda la Isla tiene asignado el valor de -326767.

2.12.4. Evaluando el número de Gaps/Holes (datos sin información) del DEM del SRTM para el caso del Ecuador Continental, hay un 0.917% de gaps. Dentro del área de estudio de  $1^\circ \times 1^\circ$  (área montañosa) para el cálculo de las anomalías de Bouguer, el número de gaps da un total de 6.229%. Finalmente el número de gaps dentro del área de estudio y la parte influenciada para la Corrección del Terreno de radio 167 Km., es de 1.678%.

2.12.5. El número de gaps del DEM del SRTM evaluados en el Ecuador Continental es mayor en la Cordillera de los Andes (zona montañosa), que en las otras regiones del país, según los porcentajes mencionados anteriormente y también inspeccionándolos de forma visual.

2.12.6. Realizando la evaluación del DEM del SRTM con los 2755 puntos de las bases de datos RGPSE y RPSAD56E respectivamente, calculando la diferencia de altura del SRTM vs. los puntos de control, se obtuvo como valor medio -4.612m, como valor de la media absoluta 7.779 m, de desviación estándar 14.185m respecto al valor medio y 12.726m de desviación estándar respecto al valor de la media absoluta. Lo que indica que para el caso del Ecuador Continental el error medio en la evaluación del SRTM es de  $7.779 \text{ m} \pm 0.994 \text{ m}$  con un nivel de confianza del 99.999%

2.12.7. Cabe destacar que dentro de los 2755 puntos utilizados para la evaluación del SRTM, existen 4 puntos comprobados que están bien en sus coordenadas pero que se alejan del valor promedio obtenido. Estos puntos son el resultado de la diferencia de las alturas del SRTM vs. las alturas  $H_n$  (niveladas trigonométricamente y geométricamente) tienen un valor -359.455, 360.078, -114.090 y -68.521 metros respectivamente.

2.12.8. En la revisión de los datos de gravedad observada de la base de datos "Densificación Gravimétrica del Ecuador", de un total de 1639 puntos, 1610 satisfacen con los requerimientos de cálculo de las Anomalías de Bouguer, de los cuales sólo 158 puntos fueron utilizados ya que éstos pertenecen al área estudio.

2.12.9. Para el caso del área de estudio de  $-2^\circ$  a  $-1^\circ$  de latitud y de  $-79.5^\circ$  a  $-78.5^\circ$  en longitud, los valores de densidad obtenidos del MDVLD se encuentran en un rango de  $2.58 \text{ gr/cm}^3$  a  $2.75 \text{ gr/cm}^3$  y como valor medio se obtuvo  $2.6 \text{ gr/cm}^3$

2.12.10. Los resultados obtenidos del cálculo de las Anomalías de Bouguer simple (incompleta) demuestran que si se utiliza una densidad de  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  para cada punto en el cálculo del Plato de Bouguer y no una densidad media para cada punto obtenida del MDVLD, se obtendrán como resultados de estas anomalías valores más negativos, por ejemplo: el valor medio de las anomalías de Bouguer simple con densidad igual  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  es -173.75 mgal y utilizando una densidad media para cada punto es -168.12 mgal.

2.12.11. Si se utiliza para el cálculo de la Corrección del Terreno (CT) una densidad igual a  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  y no la densidad promedio  $2.6 \text{ gr/cm}^3$  obtenida del MDVLD, los resultados de la Corrección del Terreno serán mayores, por ejemplo: el valor medio de la CT con densidad de  $2.67 \text{ gr/cm}^3$  es 50.6936 mgal, valor máximo 144.6596 mgal y como valor mínimo 2.4211 mgal respectivamente, mientras que utilizando una densidad de  $2.6 \text{ gr/cm}^3$  el valor medio fue de 49.3645 mgal, el máximo de 140.8670 mgal y el mínimo de 2.3576 mgal respectivamente.

2.12.12. La diferencia promedio dentro del área de estudio de utilizar las anomalías de Bouguer simple o anomalías de Bouguer completa, se encuentra en el orden de 49.3645 mgal. Se puede generalizar que en las zonas montañosas si no se calcula la Corrección del Terreno existirá una diferencia aproximada de 50 mgal en el Ecuador Continental.

## 2.13. RECOMENDACIONES:

2.13.1. Con los resultados obtenidos, se recomienda utilizar para el cálculo del Plato de Bouguer, un valor medio de densidad para cada punto, en este caso los valores de densidad se pueden obtener de un MDVLD.

2.13.2. Para mejorar los resultados de un MDVLD en todo el Ecuador, se necesita mayor cantidad de información, trabajo e investigación en los estudios geológicos y geofísicos.

2.13.3. Según las investigaciones de Bajracharya (2002) (en Tierra A., 2003), que hizo un estudio utilizando variación de densidades laterales en el cálculo de la corrección del terreno, se sugiere, que se use una densidad media en el área de estudio para la Corrección del Terreno, especialmente en áreas de grandes montañas.

2.13.4. Para obtener mejores resultados en las Correcciones del Terreno utilizando la metodología de Forsberg, se recomienda utilizar un Modelo Digital de Elevaciones de alta resolución. Para nuestro medio, teóricamente debería ser un modelo de mayor resolución que el SRTM, es decir un DEM generado a partir de cartas topográficas a escala 1:50.000 o mayores. Pero para la parte exterior del Ecuador (Colombia y Perú) el SRTM satisface muy bien con las necesidades de la CT.

2.13.5. Si se va a utilizar el SRTM en el cálculo de la Corrección del Terreno con el programa "TC" diseñado por Forsberg, se sugiere para tener mejores resultados, parchar las áreas con gaps del SRTM y utilizar el método de interpolación de la distancia pondera o de los vecinos más cercanos para los gaps pequeños (1 o 2 píxeles).

2.13.6. En las áreas de grandes huecos se sugiere para parchar:

2.13.6.1. Tomar algunos puntos de control con GPS en los sectores con gaps, utilizar las coordenadas de los puntos en el cálculo de la Ondulación Geoidal a través del Modelo EGM96 y sacar el valor de la Altura  $H_n$  aproximado (para las precisiones del SRTM son una buena alternativa). Entre las desventajas de este método están el tiempo de ejecución, la dificultad de tomar puntos en las partes altas de las montañas y los costos que involucraría.

2.13.6.2. Otra alternativa sería digitalizar cartas 1:50.000 y generar un DEM en las zonas que no tienen información; luego se pueden empatar estas zonas como un mosaico utilizando algún software.

2.13.6.3. Otra solución sería utilizar el SRTMFILLscript de MicroImages que permite parchar las áreas sin datos del SRTM con cualquier DEM local disponible.

2.13.7. Se recomienda hacer una mayor densificación de los puntos gravimétricos en todo el Ecuador, distribuidos especialmente en las áreas sin información ya que los puntos existentes son insuficientes para generar una buena malla de anomalías de Bouguer completa. a través de los métodos de interpolación existentes.

2.13.8. Finalmente se recomienda para el cálculo de las anomalías de Bouguer aplicar las anomalías de Bouguer Completa con una densidad media para cada punto en el plato de Bouguer, una densidad media en el área de estudio y un DEM de la más alta resolución para obtener mejores resultados en la CT.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Badell, C. **Notas sobre Geodesia Física**. Maracaibo, Venezuela, Universidad del Zulia, Escuela de Ingeniería Geodésica, ingresado 09/09/2006.
- Departamento de Geodesia. **Densificación Gravimétrica del Ecuador**. Quito, Ecuador, IGM, ingresado 09/09/2006.
- Departamento de Geodesia. **Monografías de los puntos de Control Horizontal y Vertical del Ecuador en el Sistema de Referencia PSAD56**. Quito, Ecuador, IGM, ingresado 03/04/2006.
- Departamento de Geodesia. **Procesamiento de la RED GPS del Ecuador dentro del Marco de Referencia SIRGAS**. Munich, Alemania, DGFI; IGM Ecuador, Reporte 73, ingresado 13/09/2006.
- Drewes, H.; Sánchez, L. **Curso de Sistemas de Referencia en Geodesia**. Quito, Ecuador, IGM, 2002.
- Drewes, H.; Sánchez, L.; Blitzkow, D.; Freitas, S. **Sistema Vertical de Referencia para América del Sur**. SIRGAS, GT-III, ingresado 14/09/2006.
- <ftp://e0dps01u.ecs.nasa.gov/srtm>
- <ftp://edcsgs9.cr.usgs.gov/pub/data/srtm/>
- Haberstock, E. **Curso Básico de Gravimetría**. Cartagena, Colombia, INGEOMINAS, 1985.
- Heiskanen, W.; Moritz, H. **Geodesia Física**. Madrid, España, Instituto Geográfico Nacional; Instituto de Astronomía y Geodesia, 1985.
- Heiskanen, W.; Moritz, H. **Geodesia Física**. Londres, Inglaterra; San Francisco, USA, W. H. Freeman and Company, 1967.
- Hoar, G. **Topografía por Satélite: Curso de Geodesia Satelital**. Ecuador, ESPE, 1987.
- <http://66.77.122.13/InternationalStatic/PopUps/DEM/SRTM90.htm>
- <http://edcsns17.cr.usgs.gov/srtm/index.html>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Misi%C3%B3n\\_topogr%C3%A1fica\\_Radar\\_Shuttle](http://es.wikipedia.org/wiki/Misi%C3%B3n_topogr%C3%A1fica_Radar_Shuttle)

- <http://recursos.gabrielortiz.com>
- <http://seamless.usgs.gov>
- <http://www.agencynima.ing.gov.ec>; Ing. John Gatesgatesj@nima.mil
- <http://www.belt.es/noticias/2005/enero/11/nasa.htm>
- <http://www.geocities.com/CapeCanaveral/1526/shuttle.html>
- <http://www.icv.gva.es/index.htm>
- <http://www.inta.gov.ar/mjuarez/info/documentos/Agprecis/comp03.htm>
- <http://www.microimages.com/freestuf/scripts.htm>
- Leiva, C. **Determinación de Parámetros de Transformación entre los Sistemas PSAD 56 y WGS 84 para el Ecuador:** Tesis de Grado. Quito, Ecuador, ESPE, 2003.
- Leiva, C. **El Proyecto SIRGAS y la Realización de la Red Nacional GPS del Ecuador.** Quito, Ecuador, Instituto Geográfico Militar, 2005.
- Leiva, C.; Robayo, A. **Curso Básico de Gravimetría.** Quito, Ecuador, INOCAR, 2006.
- Merrigan, M.; Swift, E.; Wong, R.; Saffel, J. **A Refinement to the World Geodetic System 1984 Reference Frame.** USA, Presented at the Institute of Navigation, ION-GPS-2002, Portland, OR Sept, 2002, ingresado 14/09/2006
- Microsoft® Encarta® 2006 [CD]. **Sistema de referencia.** Microsoft Corporation, 2005.
- Microsoft® Encarta® 2006 [CD]. **Curvas de Nivel.** Microsoft Corporation, 2005.
- Mironov, V. **Curso de Prospección Gravimétrica.** Barcelona, España, Editorial Reverté, S.A., 1977.
- Sánchez, L. **Adopción del Marco Geocéntrico Nacional de Referencia MAGNA-SIRGAS como Dátum Oficial de Colombia.** Bogotá, Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, 2004.
- Sánchez, L. **Hacia un Sistema Vertical de Referencia Unificado para América del Sur.** Caracas, Venezuela, XX Reunión de Consulta de la Comisión de Cartografía del IPGH, 2005.
- Sánchez, L. **Sistemas de Referencia: Una Descripción.** Bogotá, Colombia, Instituto Geográfico Agustín Codazzi, *lsanchez@igac.gov.co*, 2004.
- Sansó, F.; Brovelli, M.; Migliaccio, F.; Vajani, C. **International School for the Determination and Use of the Geoid.** Milan, Italia, IGS, 1994.
- Sevilla, M.; Núñez, A. **Ajuste y análisis estadístico de ondulaciones del geoide obtenidas por métodos astrogeodésicos.** Madrid, España, Instituto de Astronomía y Geodesia, ingresado 17/10/2006.
- Terra, A. **Metodologia para a Geração de Grid de Anomalias Gravimétricas para obtenção de Geoide Gravimétrico Local a partir de dados esparsos:** Tesis de Grado. Curitiba, Brasil, 2003.
- U. S. Department of the Interior; U. S. Geological Survey. **SRTM DETED: Level 1 Data.** USA, USGS, 2006
- Vaníček P., Petr, V.; Santos, M.; Tenzer, R.; Hernandez, A. **Algunos aspectos sobre alturas ortométricas y normales.** Revista Cartográfica, Vol. 76-77, pp. 79-86., 2004.