

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**INTERPRETACIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS CON FINES DE
EXPLORACIÓN MINERA EN LA ZONA SAN RAFAEL-EL CALLAO.
ESCUDO DE GUAYANA, ESTADO BOLIVAR.**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título de Ingeniero Geofísico
Por la Br. Nanvir C. Escorihuela H.

Caracas, Junio de 2004.

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**INTERPRETACIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS CON FINES DE
EXPLORACIÓN MINERA EN LA ZONA SAN RAFAEL-EL CALLAO.
ESCUDO DE GUAYANA, ESTADO BOLIVAR**

**TUTORA ACADÉMICA: Prof. INÍRIDA RODRÍGUEZ
COTUTOR ACADÉMICO: Prof. SEBASTIÁN GRANDE
TUTOR INDUSTRIAL: Ing. OCTIMIO GUTIÉRREZ**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela
para optar al Título de Ingeniero Geofísico
Por la Br. Nanvir C. Escorihuela H.

Caracas, Junio de 2004.

Caracas, Junio de 2004

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por la Bachiller Nanvir Escorihuela, titulado:

**INTERPRETACIÓN AEROMAGNÉTICA CON FINES DE EXPLORACIÓN
MINERA EN LA ZONA SAN RAFAEL – EL CALLAO, ESCUDO DE
GUAYANA, ESTADO BOLÍVAR.**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Geofísico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Rafael Falcón
Jurado

Prof. Romel Wilchy
Jurado

Prof. Inírida Rodríguez
Tutor Académico

Prof. Sebastián Grande
Cotutor Académico

Ing. Octimio Gutiérrez
Tutor Industrial

*A Dios y la Virgen por guiar mis pasos
A mi Familia por su apoyo y confianza
A mi novio por estar a mi lado y ser tan especial
Y a mi abuelo a quien siempre tendré presente.*

AGRADECIMIENTOS

A la ilustre Universidad Central de Venezuela por darme la oportunidad de formarme como profesional.

A la Escuela de Geología, Minas y Geofísica por permitirme realizar este Trabajo Especial de Grado como requisito para optar al título de Ingeniero Geofísico.

Al Instituto Nacional de Geología y Minas (INGEOMIN) por brindarme la oportunidad de desarrollar este Trabajo Especial de Grado.

A mi tutora la Prof. Inirida Rodríguez por permitirme formar parte de este proyecto, el cual me permitió alcanzar una meta.

Al Prof. Sebastián Grande por su apoyo, paciencia y dedicación antes y durante el desarrollo del Trabajo Especial de Grado.

A mi tutor industrial el Ing. Octimio Gutierrez por ceder toda la información requerida.

A mi tutor putativo el Ing. Angel Erasmo "Mou" por compartir todos sus conocimientos con mi persona, así como también por su amistad, paciencia y dedicación.

A el Prof. Cavada por brindarme la oportunidad de ser su preparadora, así como también por su confianza, apoyo, paciencia y dedicación.

A la Lic. Nieves Nevado y al Lic. Francisco Araujo por brindarnos su apoyo y por cedernos gran parte de su valioso tiempo.

A mi familia, a mis papás quienes siempre me apoyaron y confiaron en que lograría esta meta, a mis hermanas con quienes siempre he compartido los buenos y malos momentos, a mi abuelo que aunque ausente siempre lo tendré presente por que fue un ser muy especial, a Ivan por todo su apoyo y paciencia.

A la familia Subero Rueda por el apoyo, ayuda y confianza y en especial a mi novio por estar en todo momento a mi lado e insentivarme siempre a salir adelante.

A mis "AMIGOS" quienes me enseñaron que la amistad traspasa fronteras y que aunque se este lejos siempre cuentas con ellos.... Atiria, Román, Leonardo, Lorenzo, Nicolas, Alvis y Oriele. A mis "ALUMNOS " de métodos sísmicos y en especial a los de los semestres I y II-2003, por confiar en mi y por ser tan especiales...Los quiero mucho.

A mis compañeros de tesis con los que tuve el placer de compartir durante el desarrollo del proyecto... Liz, Emgelbert, Alexander (negrito), Leonardo, Natalia, Maxlyn (la enana) y Rafael.

A mis compañero de trabajo por su apoyo incondicional... Bismarc, María Angelica, Cecilia, Moravia, Leonardo, José Gregorio y en especial a María Elena Ramírez por haber sido como una madre para mi.

A los profesores que siempre confiaron en mi y me brindaron la oportunidad de salir adelante...María Teresa, Juan José, Olga, Ricardo, Alba, Jean Carlos, Antonio, Edixon, etc.

A la Lic. Morella y a Eduardo por soportarme y atenderme de la mejor manera posible.

A mis "AMIGOS Y COMPAÑEROS" que conocí durante el desarrollo de mi carrera y con quienes compartí buenos y malos momentos... Monica, Marisela, Enlys, Carolina, Cesar, Gregory, Carlos, Tomás, Alexis, Gustavo (el niño), Memo, Daniel, Lisandro (pollito)....

Y a todas aquellas personas que de alguna u otra forma contribuyeron al alcance de esta meta...Gracias de corazón.

Escorihuela H. Nanvir C.

INTERPRETACIÓN DE DATOS AEROMAGNÉTICOS CON FINES DE EXPLORACIÓN MINERA EN LA ZONA SAN RAFAEL-EL CALLAO. ESCUDO DE GUAYANA, ESTADO BOLIVAR

Tutor Académico: Prof. Inirida Rodríguez. Tutor Industrial: Ing. Octimio Gutiérrez. Cotutor: Prof. Sebastian Grande. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Geología, Minas y Geofísica (Ingeniero Geofísico) Año 2004, 115 Pág.

Palabras Claves:

Geoestadística, Análisis Espectral, Perfiles Magnéticos - Gravimétrico, Modelado

Resumen.

Este Trabajo Especial de Grado esta basado en la interpretación de datos aeromagnéticos en una zona ubicada al noreste del Estado Bolívar, que incluye las poblaciones de San Rafael y El Callao, limitada por las coordenadas de Latitud Norte $7^{\circ} 00'$ - $7^{\circ} 30'$ y de Longitud Oeste $61^{\circ} 45'$ - $62^{\circ} 30'$.

Para lograr los objetivos de dicho trabajo se plantea la aplicación de herramientas tales como validación de datos estadísticos, análisis geoestadístico y espectral, para generar mapa de Intensidad Magnética Total, modelos bidimensionales del subsuelo y estimar profundidades, a través de los cual se puede inferir acerca de estructuras corticales, ratificar la realidad geológica de la zona, afirmar y proponer la posible ubicación de nuevos yacimientos minerales.

A partir de los mapas de Intensidad Magnética Total y conociendo la geología de la zona se proponen zonas de mineralización con potencial económico, en las cuales se debe hacer un estudio geo – minero más detallado. El análisis espectral

permite conocer las profundidades causantes de la anomalía, que generalmente representa el contacto entre dos formaciones con propiedades distintas. Los análisis estadísticos y geoestadísticos, permiten determinar la distribución de poblaciones y la dirección de tendencia de la anomalía respectivamente.

Por último fue posible proponer un área de exploración en la parte nor-central del mapa residual de Intensidad Magnética Total.

ÍNDICE

	Págs.
Dedicatoria	i
Agradecimientos	ii
Resumen.	v
Índice.	vii
Lista de Figuras.	ix
Lista de Tablas.	xii
CAPÍTULO 1: Introducción.	1
1.1 Objetivos Generales.	2
1.2 Objetivos Específicos.	2
1.3 Ubicación del Área de Estudio.	3
1.4 Metodología.	4
1.5 Antecedentes.	7
CAPÍTULO 2: Geología de la Zona.	14
2.1 Geología Regional.	14
2.2 Geología Local.	16
2.3 Geología Estructural.	21
2.3.1 Evolución Tectónica del Escudo de Guayana.	24
2.3.2 Evolución Tectónica de los Cinturones de Rocas Verdes.	28
2.3.3 Reconocimiento Geológico de la Zona de Estudio.	33
CAPÍTULO 3: Marco Teórico.	45
3.1 Métodos Magnéticos.	45
3.1.1 Intensidad de Magnetización.	47
3.1.2 Magnetismo en las rocas.	48
3.1.3 Susceptibilidad Magnética	50
3.2 Métodos Gravimétricos.	50

CAPÍTULO 4: Validación de Datos Estadísticos y Análisis Geoestadísticos.	54
4.1 Interpretación Estadística.	54
4.2 Interpretación Geoestadístico.	58
4.3 Análisis Espectral.	61
CAPÍTULO 5: Modelado de Perfiles con Interés Geofísico.	66
5.1 Análisis Cualitativo y Cuantitativo de los Mapas Magnéticos y Graviméticos.	66
5.1.1 Mapa de Intensidad Magnética Total.	66
5.1.2 Separación Regional Residual.	66
5.1.3 Mapa de Anomalía de Bouguer.	67
5.2 Restricciones para el Modelaje Magnético.	74
5.3 Perfiles para el Modelaje Gravimétrico-Magnético del Subsuelo.	76
5.4 Modelado de Perfiles A, B y C.	78
5.4.1 Análisis de los Modelos.	82
5.5 Evaluación de Riesgos Exploratorios.	84
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	85
BIBLIOGRAFÍAS Y REFERENCIAS CITADAS	87
APÉNDICES	92
1.- Apéndice A: Nociones Básicas de Estadística y Geoestadística.	93
2.- Apéndice B: Análisis Espectral.	103
3.- Apéndice C: Análisis Aplicado a las Muestras obtenidas en el Reconocimiento de Campo	106

LISTA DE FIGURAS

Figura N°	Págs.
1.- Localización geográfica del Área de Estudio.	3
2.- Metodología de Trabajo.	4
3.- Mapa de Localización de las Líneas Sísmicas, Limitadas por Caicara al oeste y Bochínche al este; con centro de disparo en Ciudad Piar. Línea 300 (este de Ciudad Piar) y línea 900 (este de El Callao).	8
4.- Modelo de Corteza, mediante un Perfil E-W del norte del Escudo de Guayana con información Estructural y Velocidades Promedios de Onda. P en la Corteza proveniente de las Líneas Sísmicas 100, 300 y 900.	9
5.- Respuesta Gravimétrica del Perfil este-oeste, obtenida del Modelo de Velocidades.	9
6.- Provincias Geológicas del Escudo de Guayana.	15
7.- Formaciones que Constituyen la Provincia de Pastora.	17
8.- Columna Estratigráfica del Área de Estudio.	21
9.- Evolución de un Arco de Islas.	31
10.- Mapa Geológico de la zona de Estudio.	32
11.- Afloramiento en la vía que Comunica a Upata con Guasipati.	33
12.- Afloramiento de Rigolitos dentro de la Cantera PEDECA.	34
13.- Familias de Diaclasas Presente en el Afloramiento.	35
14.- Afloramiento en la vía de Guasipati.	36
15.- Afloramiento en la via de Guasipati-El Callao.	37
16.- Pliegue Recurrente Presente en el Afloramiento	37
17.- Entrada de El Callao.	38
18.- Afloramiento cerca del Hato La Nomada.	38
19.- Afloramiento en la Mina San Isidro.	39
20.- Embalse de Gurí.	40

21.- aflojamiento vía El Callao.	42
22.- Afloramiento vía El Callao.	43
23.- Líneas de Fuerza entre los Polos de una Barra Magnética, producidas por un Campo Magnético.	46
24.- Elementos Vectoriales del Campo Magnético de la Tierra.	46
25.- Histograma de Frecuencia de Intensidad Magnética Total.	55
26.- Histograma de Frecuencias de Anomalías de Bouguer.	57
27.-Curva de Ajuste de los Variogramas Teóricos de Intensidad Magnética Total.	59
28.- Representación de la Elipse de Anisotropía.	59
29.- Roseta de Distribución Espacial de Intensidad Magnética Total.	60
30.- Curva de Ajuste de los Variogramas Teóricos de las Anomalías de Bouguer.	60
31.- Elipse de Anisotropía de la Anomalía de Bouguer.	61
32.- Roseta de Distribución Espacial de la Anomalía de Bouguer.	61
33.- Análisis Espectral de Intensidad Magnética Total del Perfil A.	63
34.- Análisis Espectral de Intensidad Magnética Total del Perfil B.	64
35.- Análisis Espectral de Intensidad Magnética Total del Perfil C.	65
36.- Mapa de Reducción al Polo de la Zona de Estudio.	69
37.- Mapa de Intensidad Magnética Total de la Zona de Estudio.	70
38.- Mapa Regional de Intensidad Magnética Total de la Zona de Estudio.	71
39.- Mapa Residual de Intensidad Magnética Total de la Zona de Estudio.	72
40.- Mapa de Anomalía de Bouguer de la Zona de Estudio.	73
41.- Mapa de Anomalía de Bouguer del Área que abarca el Proyecto en Conjunto.	75
42.- Intensidad Magnética Total del Perfil A.	76
43.- Intensidad Magnética Total del Perfil B.	77
44.- Intensidad Magnética Total del Perfil C.	77

45.- Modelo Propuesto para el Perfil A.	79
46.- Modelo Propuesto para el Perfil B.	80
47.- Modelo Propuesto para el Perfil C.	81
48.- Modelo de un Histograma de Frecuencia.	94
49.- Representación de la Media, Mediana y Moda en Curvas Sesgadas.	95
50.- Modelo Esférico.	97
51.- Modelo Exponencial.	97
52.- Modelo Gaussiano.	98
53.- Modelo Efecto de Pepita puro.	99
54.- Modelo de Variograma con Meseta.	99
55.- Modelo de Anisotropía Geométrica.	100
56.-Modelo de Anisotropía Zonal.	100

LISTA DE TABLAS

Tabla N°	Págs.
1.-Periodos de Orogénesis en Venezuela Durante el Precámbrico	16
2.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 1.	34
3.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 2.	35
4.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 3.	36
5.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 4.	37
6.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 7.	39
7.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 8.	40
8.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 10.	41
9.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 11.	41
10.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 12.	42
11.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 13.	43
12.- Cuadro Descriptivo de las Muestras Tomada en el Afloramiento n° 14.	44
13.- Valores de Tendencia Central de Intensidad Magnética Total.	55
14.- Valores Característicos de los casos de Intensidad Magnética	

Total.	56
15.- Prueba de K-S para la Variable de Intensidad Magnética Total, Distribución de Contraste, normal.	56
16.- Valores Descriptivos de Anomalía de Bouguer.	58
17.- Característica de los Cuerpos Presentes en el Modelo Propuesto.	78

1.- INTRODUCCIÓN

En Venezuela existen mapas de anomalías magnéticas en diversas regiones del territorio nacional, los cuales se obtuvieron con el fin de delimitar nuevos yacimientos minerales para la exploración y explotación minera con interés económico.

Este es un proyecto conjunto que cubre un área significativa al noreste del Escudo de Guayana. Se trabajó con mapas aeromagnéticos a escala 1:50.000, los cuales fueron aportados por INGEOMIN. Los levantamientos aeromagnéticos fueron efectuados por la Aero Service Corporation de Venezuela C.A. y la Hunting Survey Corporation, durante enero y mayo de 1961.

La mayoría de estos mapas presentan problemas en la etapa de procesamiento, los cuales se ven reflejados bien sea por la aparición de curvas con suavizado extensivo, o por la presencia de un conjunto de cierres que dificultan el análisis. En vista de lo anterior, se propuso digitalizar y procesar la información disponible en una zona ubicada al noreste del Estado Bolívar, que incluye las poblaciones de San Rafael y El Callao, limitada por las coordenadas de Latitud Norte $7^{\circ} 00'$ - $7^{\circ} 30'$ y de Longitud Oeste $61^{\circ} 45'$ - $62^{\circ} 30'$ (Figura 1).

La interpretación de los datos magnéticos pertenecientes a la zona de estudio se realizó mediante la aplicación de herramientas tales como validación de datos estadísticos, análisis geoestadístico y espectral, con lo cual se generó un mapa magnético de componente total, que permita inferir acerca de estructuras corticales, ratificar la realidad geológica de la zona, afirmar y proponer la posible ubicación de nuevos yacimientos minerales.

Para el desarrollo de este trabajo se procesó e interpretó una base de 136.578 datos magnéticos, que se complementaron con un mapa de Anomalía de Bouguer e

información proveniente de una línea sísmica (SCHMITZ ET AL., 2.000) con dirección E-W que atraviesa la zona de estudio. Se modelaron tres perfiles dos con dirección N-S y uno con dirección E-W que abarca un área mayor a la estudiada.

1.1- OBJETIVO GENERAL

El objetivo principal de este proyecto es realizar una interpretación geológico-geofísica, a partir del análisis geoestadístico y espectral de datos aeromagnéticos de la zona nororiental del Estado Bolívar; para proponer nuevas áreas de interés minero sobre las cuales realizar estudios detallados de geología, geofísica y geoquímica a los fines de determinar zonas prospectivas.

1.2- OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Generar una base de datos en formato digital, del área de estudio, a partir de los mapas aeromagnéticos.
- Realizar un análisis geoestadístico de los datos.
- Elaborar mapas magnéticos con criterios geoestadísticos.
- Construir perfiles de los datos magnéticos.
- Realizar análisis espectral de los perfiles seleccionados.
- Modelar los perfiles seleccionados.
- Corroborar la ubicación en superficie de los yacimientos minerales existentes.
- Determinar nuevas zonas exploratorias.

1.3- LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La zona de estudio abarca un área de 4.620 kilómetros cuadrados y está ubicada entre las poblaciones de San Rafael y El Callao, al noreste del Estado Bolívar, entre las coordenadas 7° 00' - 7° 30' de latitud Norte y 61° 45' - 62° 30' de longitud Oeste (figura 1).

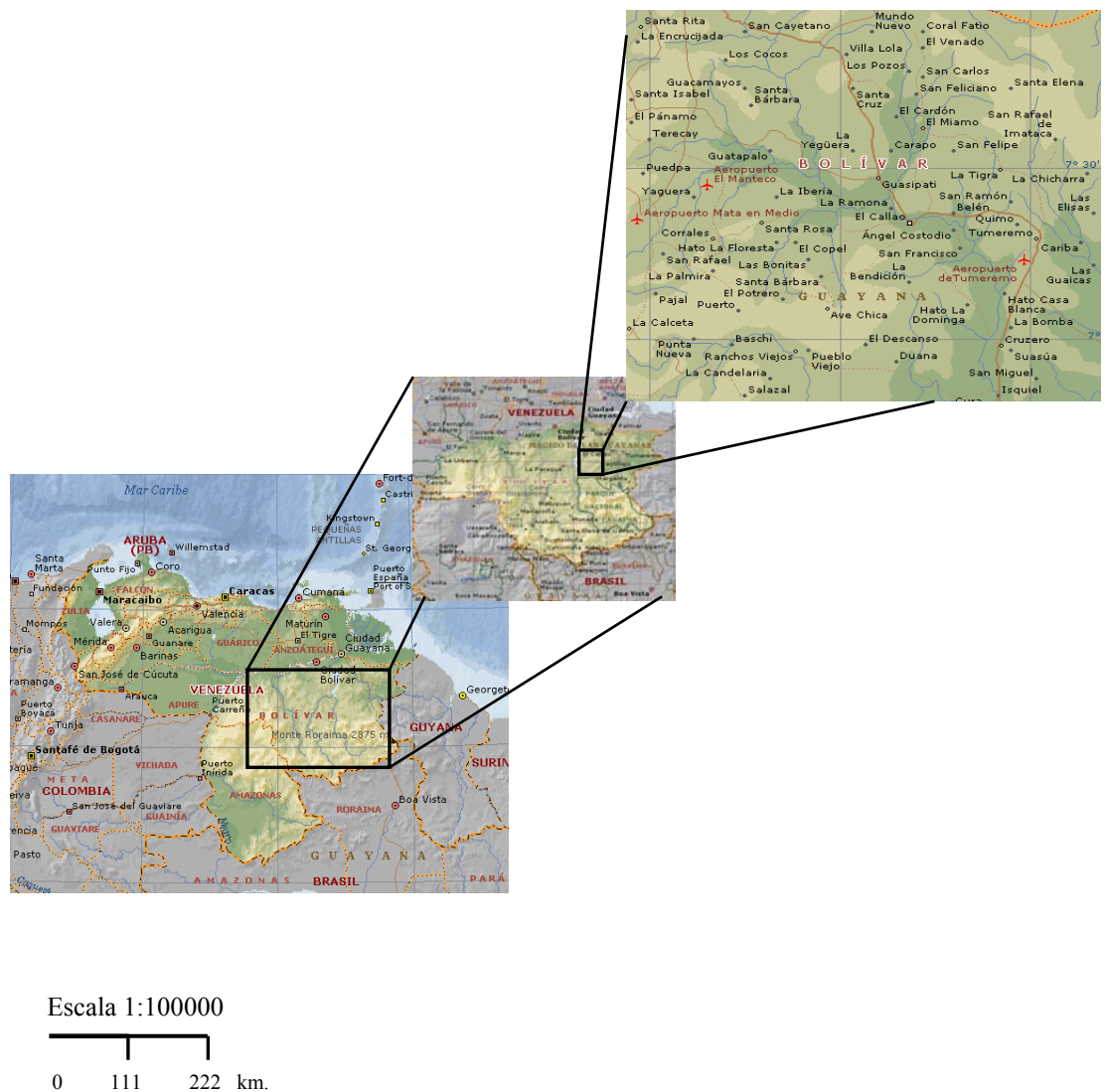


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.

1.4- METODOLOGÍA

El alcance de este proyecto es ubicar zonas magnéticas anómalas, que de alguna manera permitan predecir la existencia de minerales de interés económico.

La metodología aplicada para alcanzar el objetivo, se indica en la figura 2.

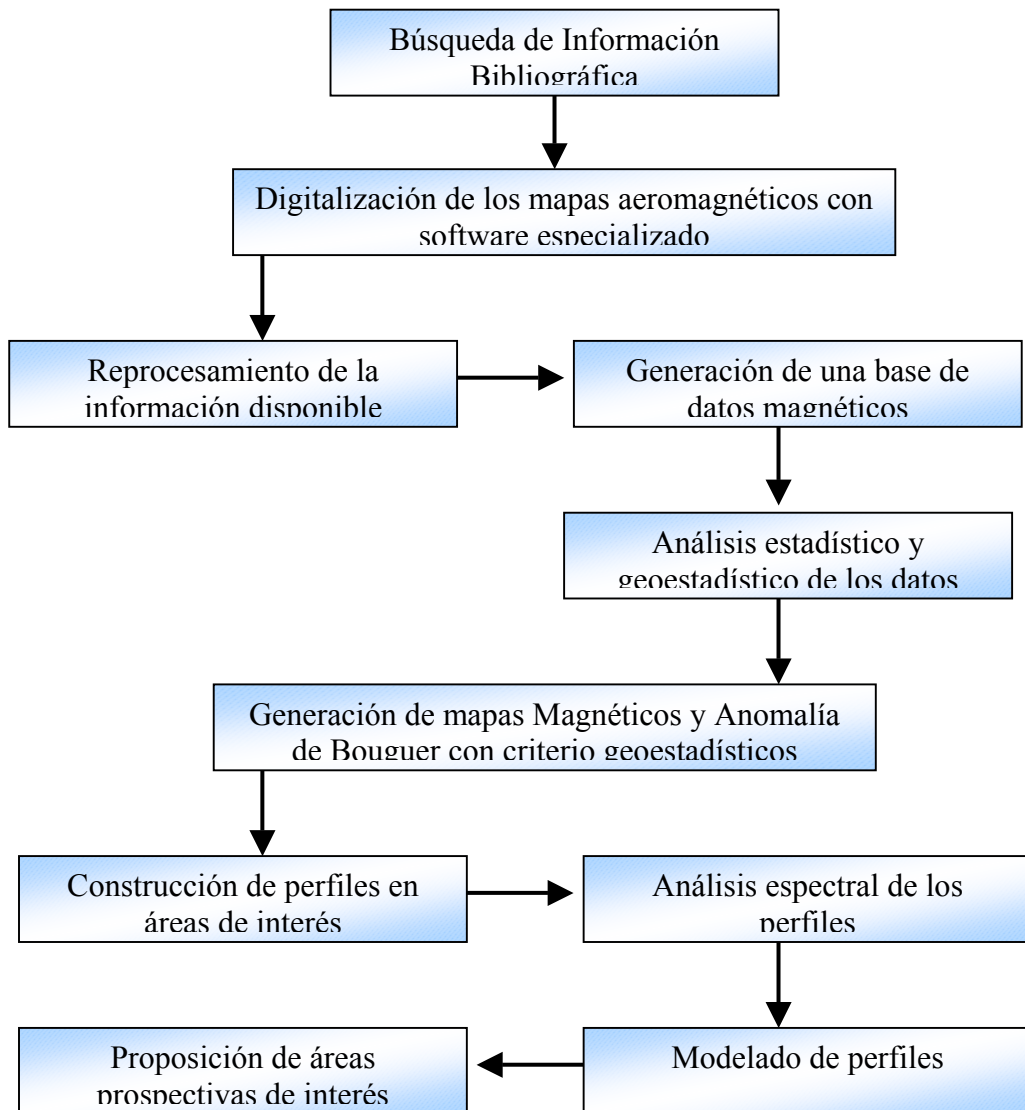


Figura 2. Metodología de Trabajo.

Búsqueda de Información Bibliográfica

Se realizó una revisión detallada y exhaustiva de la geología de la zona de estudio, para obtener información acerca del origen y formación de las estructuras y rocas presentes en el área, así como también estudios geofísicos previos para generar una mejor integración geológico-geofísica en el momento de realizar la interpretación.

Digitalización de los Mapas Aeromagnéticos

Los datos aeromagnéticos fueron obtenidos de mapas de contornos de Intensidad Magnética Total, aportados por INGEOMIN, representados en las hojas NU-45, NU-46, NU-47, NV-45, NV-46 y NV-47. El levantamiento fue realizado por la Aero Service Corporation de Venezuela C.A. y como subcontratista la Hunting Survey Corporation Ltd., durante los meses de enero y mayo de 1961, siguiendo la relación estructural de una serie compleja de rocas del Precámbrico.

Estos mapas se elaboraron a escala 1:50.000, con separaciones de líneas de vuelo de 500 m, el intervalo entre curvas es de 20 gammas y la altura de vuelo fue de 152 m.s.n.t.

Para extraer la información de los mapas fue necesario realizar la digitalización de los mapas por separado, mediante el uso del programa AutoCAD 2000® (Autodesk Inc. 2000), el cual genera una salida “.txt”, que pasará a formar parte de la base de datos de anomalías magnéticas.

Generación de una Base de Datos

La base de datos de intensidad magnética total fue obtenida mediante la digitalización de mapas aeromagnéticos, mientras que los datos gravimétricos fueron aportados por el Departamento de Geofísica de la UCV, y pertenecen a la base de datos de la Red Gravimétrica Nacional.

Análisis Estadístico

Este análisis se realizó con la intención de conocer la distribución de los datos magnéticos y gravimétricos, así como también tener un mejor control de calidad de los mismos. Para este análisis se usó el programa SPSS 7.0 (Spss Inc. 1.997); del cual se obtuvo el histograma de frecuencia, los cálculos de medidas de tendencia central y la desviación estándar de los datos por separado.

Análisis Geoestadístico

Este análisis se realizó mediante el uso del programa GRIDSTATPRO (GRIDSTATPRO INC. 1.999), con el fin de determinar el comportamiento espacial de la variable de estudio, mediante variogramas. Es importante destacar que para el análisis geoestadístico de los datos (magnéticos y gravimétricos), se utilizó el programa SPSS 7.0 (Spss Inc. 1.997), para hacer una selección de muestras aleatorias, debido a que se dispone de una versión DEMO del GRIDSTATPRO (GRIDSTATPRO INC. 1.999) y la máxima cantidad de datos que acepta es de 1000 datos.

Se calculó la dirección de la elipse de anisotropía, los ejes principales y dirección de la anisotropía, lo cual era necesario para la elaboración de los mapas gravimétricos y magnéticos.

Generación de Mapas Magnéticos y de Anomalía de Bouguer

Para generar los mapas magnéticos y de anomalía de Bouguer se utilizó el programa Surfer v 6.0 v (GOLDEN SOFTWARE INC., 1.996); la técnica empleada para obtener la separación regional residual del mapa de Intensidad Magnética Total, fue la de análisis de tendencia de superficie polinómica mediante la utilización de criterios de ajuste de superficies matemáticas por mínimos cuadrados.

Análisis Espectral

Consistió en la transformación de los datos desde el dominio espacial (o tiempo) al dominio de longitud de onda (o frecuencia), mediante el uso de la Transformada de Fourier, para estimar la profundidad de las fuentes que generan las anomalías.

Modelado de Perfiles

Para el modelado de perfiles se utilizó el programa GM-SYS (GEOSOFT INC. 1.996); se escogieron en total 3 perfiles, los cuales fueron modelados considerando la información gravimétrico-magnética y reforzándola con la geología e información sísmica de la zona.

1.5.- ANTECEDENTES

En el Escudo de Guayana se han realizado estudios geofísicos previos, que abarcan el área de estudio y zonas aledañas, los cuales se indican a continuación.

SCHMITZ ET AL. (2.000) modelaron la estructura de la corteza de una zona al noreste del estado Bolívar, con el fin de entender la evolución geológica del cratón en el noreste de Sudamérica, por medio de sísmica de refracción profunda y gravimetría.

Las líneas sísmicas con direcciones este – oeste, están localizadas en formaciones del Precámbrico del Escudo de Guayana, limitadas por las poblaciones de Caicara en el oeste y Bochinche en el este, con punto de disparo en la localidad de Ciudad Piar (figura 3), cubre una extensión de 600 km . En la zona se realizaron nueve líneas sísmicas, de las cuales dos están incluidas en el área de estudio (líneas 300 y 900). Los resultados obtenidos con la sísmica de refracción arrojan la existencia de una corteza superior con velocidades entre 6 y 6,5 km/s, hasta una profundidad de 20 km; por debajo de ésta es posible encontrar la corteza inferior con velocidades entre 6,4 y

6,7 km/s. El límite corteza - manto (discontinuidad Moho) presenta una suave inclinación de 41 a 46 km de profundidad hacia el oeste con una velocidad en el manto superior de 8,1 km/s y una velocidad promedio de la corteza de 6,5 km/s.

Las anomalías de Bouguer muestran variaciones desde 30 mgal en el oeste a -20 mgal al este, a lo largo del perfil este - oeste, lo cual parece ir en contradicción con la estructura simplificada de la corteza, obtenida de los resultados de la sismica de refracción (figura 4). Estos resultados pueden ser debido a variaciones laterales provenientes de la corteza y el manto, las cuales no son vistas en la sismica (figura 5). Las variaciones laterales de densidad pueden ser debidas a que la corteza al oeste (Arqueano) es más densa que la corteza este (Proterozoico). El mínimo gravimétrico puede ser producto de subducción de corteza oceánica a profundidad entre 120 y 150 km. SCHMITZ ET AL. (2.000).

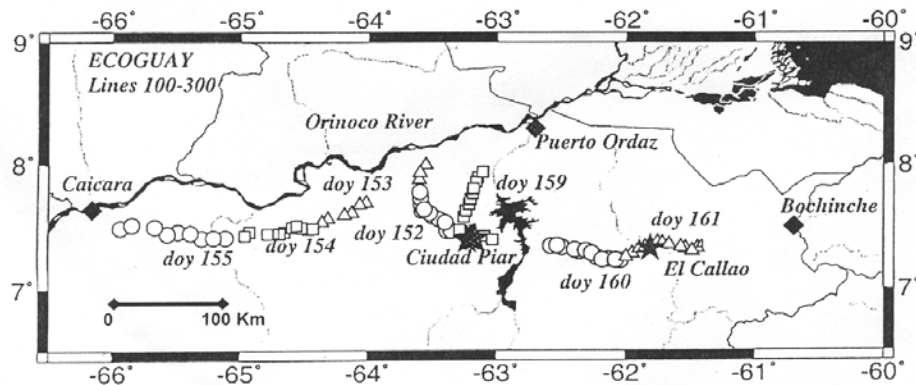


Figura 3. Mapa de localización de las líneas sísmicas, limitadas por Caicara al oeste y Bochinche al este; con centro de disparo en Ciudad Piar. Línea 300 (este de Ciudad Piar) y línea 900 (este de El Callao) (SCHMITZ ET AL., 2000).

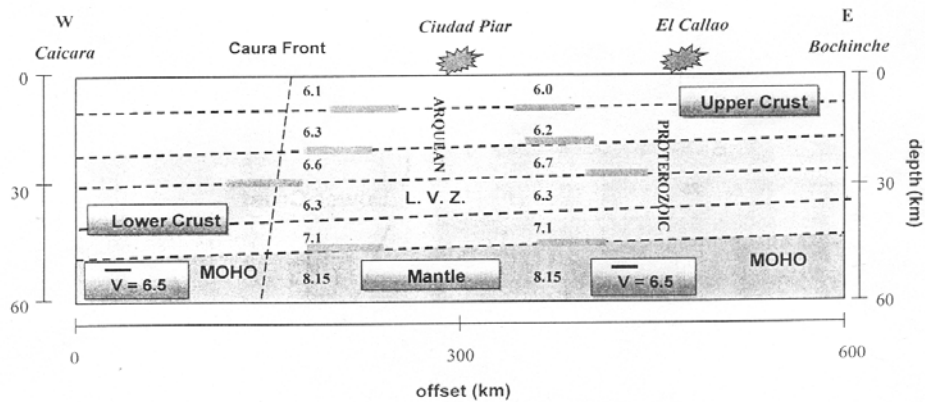


Figura 4. Modelo de corteza, mediante un perfil E – W del norte del Escudo de Guayana con información estructural y velocidades promedio de onda P en la corteza proveniente de las líneas sísmicas 100, 300 y 900 (SCHMITZ ET AL., 2000).

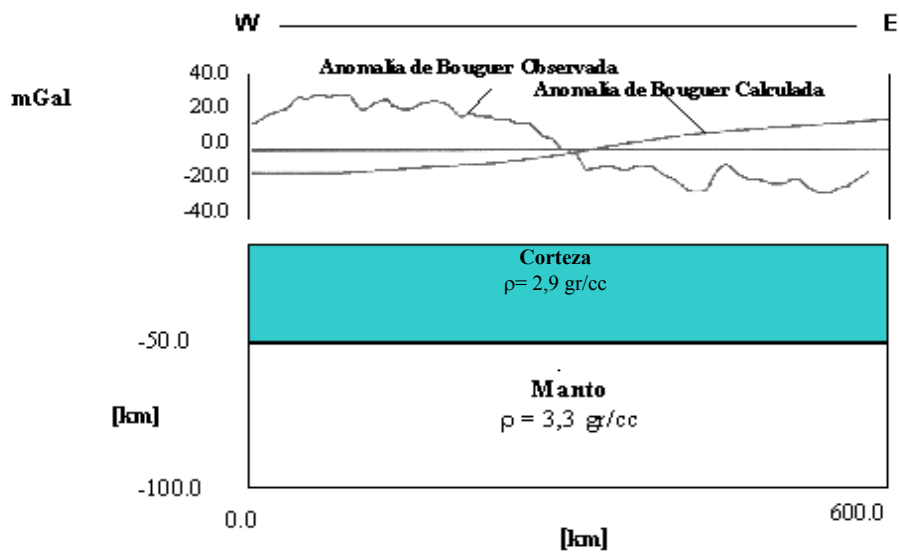


Figura 5. Respuesta gravimétrica del perfil este-oeste, obtenidos del modelo de velocidades (Modificado de SCHMITZ ET AL., 2000).

CASTILLO ET AL. (1.986) realizaron un estudio paleomagnético, mediante el uso de muestras recolectadas en nueve sitios pertenecientes a la región de La Escalera, Estado Bolívar. Las litologías estudiadas comprenden areniscas de la Provincia de

Roraima, gneises y granitos de Supamo y diabasas precámbricas intrusivas, rocas que forman parte del Escudo de Guayana, las cuales han estado sometidas a varios eventos tectonotermales a escala regional y local.

Los resultados de la intensidad del magnetismo remanente natural y la susceptibilidad magnética mostraron gran dispersión, debido a la variación en la concentración y volumen de los minerales magnéticos dentro de cada sitio, particularmente en las rocas cerca de los contactos. Respecto a la interpretación de anomalías, es posible destacar que los resultados obtenidos no son concluyentes por la complejidad geológica, la relevancia de factores locales y la escasez de datos.

Por otra parte fue posible conocer la dirección del magnetismo remanente, de cada uno de los sitios de donde fueron extraídas las muestras, los cuales se dan a conocer a continuación:

Supa 1: dirección sur-sureste de inclinación intermedia positiva.

Supa 2: dirección nor-noreste con inclinación baja.

Supa 3: dirección oeste-noroeste con inclinación alta negativa de buena estabilidad (tres muestras).

Diro 14: dirección este-sureste de inclinación baja generalmente negativas (muestras próximas al contacto). El resto mostró una intersección diametralmente opuesta a la anterior.

Diro 13: las direcciones de estas muestras coinciden con las del anterior, pero con una inclinación mayor.

Diro 16: los resultados son dispersos e inestables, pero tienden a describir intersecciones este-noreste e inclinación baja.

Brec: estas muestras presentaron gran dispersión. Sin embargo es posible observar varios sitios de remagnetización que diverge de una dirección nor-este con inclinación alta negativa.

Diro 15: aquí se mostraron características de las diabasas del tope de La Escalera.

Aro: estos resultados fueron muy estables con direcciones noreste de inclinación baja positiva bien agrupadas.

Los nombres Supra y Brec designan gneises y granitos del Complejo de Supamo, mientras que Diro y Aro se refieren a diabasas y areniscas de la Provincia de Roraima.

GRATEROL ET AL. (1.988) realizaron un estudio para correlacionar la gravimetría regional y la ocurrencia aurífera en la Provincia de Pastora, utilizando los datos de la Red Gravimétrica Nacional correspondientes al área. Se obtuvo un mapa de anomalía de Bouguer de la región y la separación regional – residual, para reconocer en el mapa residual los cambios laterales de densidad, lo cual permitió la interpretación de fallas y patrones estructurales, que junto con fotografías aéreas y otros métodos de sensores remotos, permitieron establecer un patrón estructural final.

Las curvas de isoanomalías de Bouguer en la región en estudio forman mínimos negativos que alcanzan valores de -70 mgal, al sur de Tumeremo y -50 mgal, al norte de Guasipati, noreste de El Manteco y entre El Manteco y El Dorado. Estos mínimos se correlacionan con los domos graníticos dentro del Complejo de Supamo, propuestos por MENÉNDEZ en 1968. También es posible observar máximos gravimétricos que alcanzan valores de -15 mgal en la región de El Callao, -20 mgal al noreste de El Dorado, -30 mgal en la carretera Tumeremo-Anacoco, y -20 a -30 mgal al noreste de El Dorado. Los gradientes gravimétricos entre -40 mgal/km y -50 mgal/km constituyen la zona de contacto entre las unidades graníticas del Complejo Supamo y la secuencia supracortical de Pastora.

Para el presente estudio se efectuó la separación regional - residual por análisis de superficie de tendencia, análisis espectral y continuación de campo. Para la zona en

investigación se determinó que con la continuación hacia arriba de 10 km se logran distinguir los caracteres geológicos regionales de la Provincia de Pastora.

El mapa residual de la continuación de campo hacia arriba 10 km resalta las estructuras locales que generan las distorsiones en el gradiente regional. El mapa regional por consiguiente mantiene una relación más estrecha entre los resultados gravimétricos y los caracteres geológicos del Escudo de Guayana. Las unidades supracorticales del Supergrupo Pastora están perfectamente definidas por toda la zona de anomalías mayores a +5 mgal. Las rocas graníticas del Complejo Supamo se definen por toda la zona de anomalías menores de 5 mgal . El intervalo de gradientes residuales entre -5 mgal y +5 mgal determina el contacto entre las unidades menos densas (de composición granítica) y la secuencia supracortical, lo cual también permite diferenciar fallas. Es importante recalcar que la zona de falla que delimita los residuos positivos de los negativos, es posiblemente donde se lleva a cabo la exploración aurífera intensa.

Durante 1987 y 1991, se realizó un proyecto cooperativo en el Escudo de Guayana Venezolano entre la U.S Geological Survey y la C.V.G. Técnica Minera C.A, en el cual describen la geología y geofísica de dicha zona y se dan a conocer los recursos minerales presentes en un área de 415.000 km².

El principal objetivo de este proyecto en conjunto fue la realización de mapas geológicos y tectónico-estructurales, así como también la exploración y evaluación de minerales y la estimación del número de depósitos minerales sin descubrir, presentes en el Escudo de Guayana Venezolano.

Para llevar a cabo este estudio se contó con información geológica, geofísica e imágenes de radar. Los datos geofísicos disponibles para la parte sur y este de Venezuela incluyen datos aeromagnéticos con cobertura de un 60%, datos gravimétricos que cubren acerca de 50% y aeroradimétrico con menos de 40% de

cobertura; las imágenes de radar abarcan áreas donde la información geológica es deficiente.

Las ocurrencias minerales prospectadas en el Escudo de Guayana, incluyen más de 450 minas, de las cuales aproximadamente 200 son de oro, 100 de diamante, 14 depósitos de hierro-magnesio, 35 de hierro bandeado en formaciones y 40 ocurrencias de bauxita. También existen manganeso, estaño aluvial, titanium, barita, caolín, dolomita, molibdeno, uranio, elementos tierras raras y tungsteno.

Basándose en los depósitos minerales existentes en el Escudo de Guayana Venezolano, se clasificaron (por tipo) y definieron (por tonelada) algunos minerales descubiertos en la zona, pero debido a la escasez de datos geofísicos en la parte noroeste y sureste del escudo, así como también la falta de un mapa de reconocimiento geoquímico para demostrar la distribución de elementos y un mapa geomorfológico regional, no fue posible realizar una estimación cuantitativa de los depósitos minerales que aún existen.

2.- GEOLOGÍA DE LA ZONA

2.1- GEOLOGÍA REGIONAL

Las rocas más antiguas de la geocronología venezolana pertenecen al Escudo de Guayana, en el cual se distinguen cuatro provincias geológicas constituidas por igual número de conjuntos litológicos distintos. Estas provincias se diferencian en sus direcciones estructurales, estilo de deformación tectónica, grado metamórfico, asociaciones litológicas y metalogénicas y edades (GONZÁLEZ DE JUANA ET AL., 1.980). A continuación se describen las provincias geológicas que conforman el Escudo de Guayana.

Provincia de Imataca: Está ubicada en el extremo norte de la Guayana Venezolana y ocupa una faja de anchura variable entre 65 y 130 km, orientada ESE-WNW, limitada por el río Caura al oeste y el estado Delta Amacuro al este. Esta Provincia está conformada por gneises, granulitas y formaciones de hierro del Complejo Imataca de edad Arqueano, y contiene, además, remanentes de rocas verdes de edad Proterozoico Temprano. La Provincia de Imataca, con toda su secuencia estratigráfica, se encuentra afectada por pliegues isoclinales replegados en pliegues abiertos. En el norte los ejes de los pliegues isoclinales tienen dirección noreste, mientras que al sur tienen dirección este-oeste. En el Complejo de Imataca la mayoría de las rocas guardan registros radimétricos de los eventos metamórficos regionales y de la actividad ígnea, y se han encontrado protolitos metasedimentarios de rocas gnéissicas que tienen edades entre 3400-3700 Ma, donde se han determinado las edades de diferentes eventos regionales. (MENDOZA, 1.991).

Provincia de Pastora: Constituida por cinturones de rocas verdes de edad Proterozoico temprano (Supergrupo Pastora y Grupo Botanamo), intrusionados por cuerpos dómicos de granitos sódicos (Complejo de Supamo). Cubre un área de 50000

km² al sur de la Provincia de Imataca, con la cual está en contacto de falla (Falla de Gurí, principalmente) y se extiende hacia el este y sudeste en el Escudo, fuera de Venezuela, hasta Surinam. Las edades radiométricas de las rocas que aquí afloran varían entre 1740 Ma (HURLEY *ET AL.*, 1.967) y 2000 Ma (CHASE, 1.965). En el área de estudio afloran formaciones pertenecientes a esta provincia, por tal razón se realizará posteriormente una revisión detallada de su geología (figura 6).

Provincia de Cuchivero: Está formada por lavas y tobas riolíticas levemente metamorfizadas (Formación Caicara) de edad Proterozoico Temprano, intrusionadas por extensos plutones de cuarzo monzonita y granitos (Granito de Santa Rosalía e intrusivos asociados). Está ubicada hacia la parte sur-central y occidental del Escudo de Guayana venezolano.

Provincia de Roraima: Se encuentra localizada en el extremo sur-oriental del Escudo de Guayana, constituida por areniscas arcóscicas, cuarcitas, conglomerados, lutitas y tobas vítreas no metamorfizadas (Grupo Roraima), de edad Proterozoico temprano, intrusionado por extensos mantos tabulares de diabasa. Esta provincia presenta amplios y muy suaves pliegues y fallas regionales normales por donde han penetrado esas rocas intrusivas básicas.

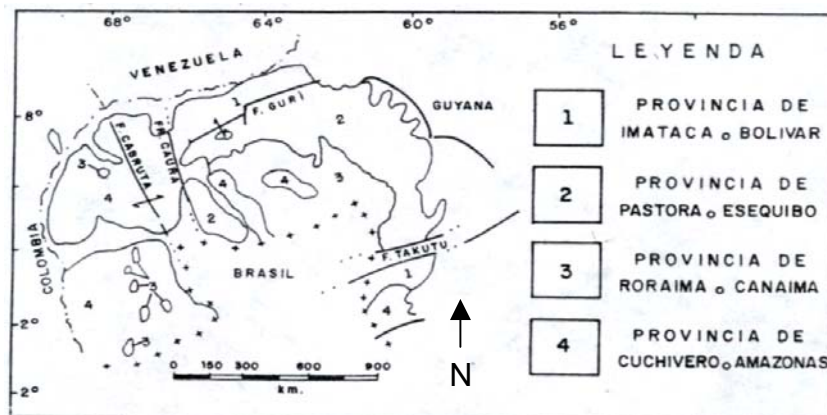


Figura 6. Provincias Geológicas del Escudo de Guayana, nombres según MENÉNDEZ (1.968) y MENDOZA (1.977).

2.2- GEOLOGÍA LOCAL: PROVINCIA DE PASTORA

La Provincia geológica de Pastora consiste principalmente de rocas metavolcánicas básicas e intermedias, rocas graníticas y rocas metasedimentarias, las cuales fueron afectadas por la Orogénesis Pre-Transamazónica (2600-2100 Ma) según MENÉNDEZ (1.968) y MENDOZA (1.977), (tabla 1).

Tabla 1. Períodos de Orogénesis en Venezuela durante el Precámbrico.

Según Martín B. (1.974, p 252)		Según Mendoza (1.977, p 2237)	
GURIENSE	3400-3000 m.a.	GURIENSE	3600-2700 m.a.
AROENSIS	2750-2650 m.a.		
	(Reactivado)	PRE-TRANSAMAZONICO 2600-2100 m.a.	
	2500-2310 m.a.		
TRANSAMAZONICO	2000-1800 m.a.	TRANSAMAZONICA	2000-1700 m.a.
PARGUAZENSIS	1600-1500 m.a.		
ORINOQUENSE	1300-850 m.a.	ORINOQUENSE	1200-800 m.a.

Las rocas que pertenecen a la Provincia de Pastora han sufrido un metamorfismo de bajo grado en la facies de los esquistos verdes, alcanzando localmente la facies de la anfíbolita. El potencial geoeconómico de esta provincia, lo constituyen depósitos de oro asociados a cinturones de rocas verdes y aluviones. Otros minerales a considerar son: tungsteno, titanio, cromo y níquel, así como también rocas ornamentales.

A continuación se presenta una breve descripción acerca de las divisiones estratigráficas de la Provincia de Pastora (figura 7):

Super Grupo Pastora: Conformar una secuencia supracortical que, en el cinturón de rocas verdes de Guasipati, se encuentra representada por la unidad de rocas volcánicas félsicas y sedimentarias asociadas. Estratigráficamente se divide en el Grupo Carichapo que incluye a la Formación El Callao y la Formación Cicapra, infrayacente a la Formación Yuruari (figura 7).

Complejo Supamo

Contacto intrusivo concordante

Formación Caballape

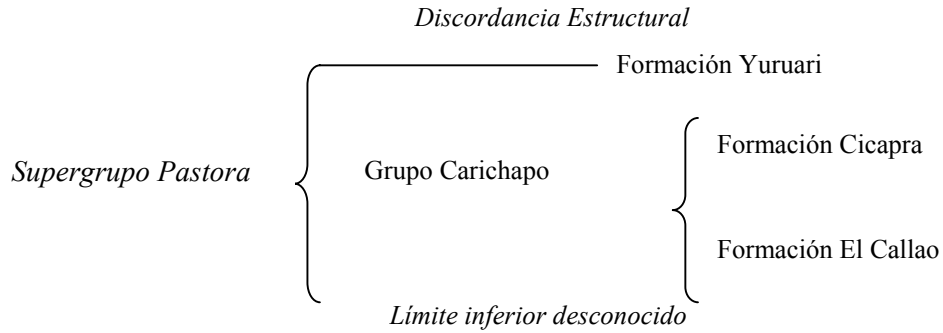


Figura 7. Formaciones que constituyen la Provincia de Pastora. Modificado de MENÉNDEZ (1.972).

Grupo Carichapo: BENAÏM (1.972) propone que este grupo corresponde en la región de Guasipati - El Callao a una faja montañosa de 60 km de longitud con orientación noreste. MENÉNDEZ (1.968) diferencia la Formación Carichapo en dos formaciones, El Callao y Cicapra. Las rocas del Grupo Carichapo se caracterizan por sus lavas basálticas; se encuentra infrayacente en contacto transicional con la Formación Yuruari y el contacto inferior son las intrusiones graníticas del Complejo Supamo. Cerca de los contactos con el complejo granítico, las rocas del Grupo Carichapo tienen metamorfismo de grado medio y, a medida que se alejan, disminuye el grado metamórfico hasta facies de bajo grado.

Formación El Callao: La sección tipo de esta unidad se encuentra en el río Yuruari y su espesor en la región de El Callao es de aproximadamente 1200 m y conforma un cinturón montañoso de topografía accidentada (KOROL, 1.965). Esta unidad tiene un espesor de 3000 m, inmediatamente al sur y suroeste de El Callao y, en el resto de la región, debe de tener mucho menor espesor, pero es difícil calcularlo

debido al plegamiento isoclinal que afecta a la región (MENÉNDEZ, 1.968). La Formación El Callao se encuentra intrusionada por cuerpos de rocas máficas que se encuentran deformados de la misma manera que la roca caja (MENÉNDEZ, 1.972).

La Formación El Callao se encuentra constituida principalmente por metalavas anfibólicas de composición basáltica, las cuales se presentan en flujos almohadillados. La parte superior de esta formación contiene capas discontinuas de metaftanita ferruginosa y manganesífera, las cuales son también comunes en las formaciones Cicapra y Yuruari suprayacentes. Esta Formación tiene un contacto inferior concordante con las rocas intrusivas graníticas del Complejo de Supamo. El contacto superior es transicional con la Formación Cicapra y hacia el sur es concordante con la Formación Yuruari (MENÉNDEZ, 1.968).

Formación Cicapra: Consiste en un 80% de esquistos anfibólico-biotítico-epidótico-albíticos, que originalmente representaban brechas y tobas básicas depositadas en aguas someras, grauvacas y limolitas grauváquicas de estratificación media a laminar (MENÉNDEZ, 1.968). El metamorfismo que afecta a estas rocas se encuentra en la facies de los esquistos verdes en el sur y hacia el norte progresa a la facies de la anfibolita. La localidad tipo de la Formación Cicapra aflora en el río Yuruari en el sector comprendido entre dos puntos situados a 500 m del paso Morochito y el otro un kilómetro al este de la quebrada Cicapra, en el Estado Bolívar (MENÉNDEZ, 1.968). Esta formación tiene un contacto superior gradacional con la Formación Yuruari.

La Formación Cicapra se encuentra intrusionada por diques y sills de pórfidos de cuarzo, los cuales son muy frecuentes en los alrededores de los stocks de pórfidos de cuarzo, que también intrusionan a esta formación en los alrededores de la Provincia de Pastora (MENÉNDEZ, 1.968).

Formación Yuruari: La localidad tipo se ubica en el sector del río Yuruari , situada en un punto 1 km al este de la desembocadura de la quebrada Cicapra y otros 5 km al sureste del caserío Pastora (MENÉNDEZ, 1.968). En la región de Guasipati la Formación Yuruari es transicional a la Formación Cicapra. Al sur de la región, donde esta última no aflora, la Formación Yuruari es transicional a las rocas de la Formación El Callao (MENÉNDEZ, 1.968).

Las rocas de la Formación Yuruari están metamorfizadas a la facies de los esquistos verdes y localmente presentan superposición de metamorfismo de contacto cerca de los cuerpos graníticos jóvenes, hasta alcanzar la facies de hornfels hornbléndicos.

Complejo Supamo: MENÉNDEZ (1.968) introduce este nombre para designar un conjunto de rocas graníticas metamorfizadas que forman cuerpos dómicos concordantes con las rocas supracorticales. El Complejo Supamo se encuentra compuesto litológicamente por paragneises biotíticos, migmatitas y rocas félsicas (trondhjemitas, tonalitas, cuarzo-dioritas) pobres en feldespatos potásicos.

Según ESPEJO (1.972) las rocas que componen el complejo se encuentran levementes foliadas a foliadas, o son fuertemente gnéissicas con lineaciones minerales bien definidas. En el Complejo hay presencia de rocas ígneas ácidas como trondhjemitas, granodioritas y cuarzo monzonitas.

Grupo Botanamo: BENAÏM (1.972) introduce este nombre para agrupar las formaciones Caballape y Los Caribes en la región noreste del estado Bolívar, en El Callao, y este, sur y oeste de El Dorado. El contacto entre estas dos formaciones es bien definido y sin transiciones en el río Botanamo. Las rocas pertenecientes a este grupo conforman el cinturón de rocas verdes más joven de la Provincia de Pastora. Este cinturón se encuentra menos metamorfizado que los del Super grupo Pastora y tiene mayor abundancia de rocas sedimentarias (C.V.G. TECMÍN, 1.987).

Formación Caballape: Esta unidad representa una secuencia sedimentaria constituida por "lodolitas y grauvacas de grano fino a medio" (KOROL, 1.965). MENÉNDEZ (1.968) indica que la descripción anterior es vaga debido a que no se destaca la abundancia de fragmentos volcánicos en las rocas, de tal manera que describe a esta formación como rocas epiclásticas volcánicas (limolitas, grauvacas y conglomerados) en un 80% y probables rocas piroclásticas (tobas y brechas) en un 20% aproximadamente.

La Formación Caballape suprayace discordantemente a las rocas del Grupo Carichapo, el cual se encuentra afectado por un intenso plegamiento isoclinal. Esta formación se encuentra afectada por pliegues abiertos, que según MENÉNDEZ (1.968), en la región de Guasipati, se encuentra representada por una topografía plana que está cubierta por suelos residuales limosos

Las rocas de esta formación solamente se encuentran afectadas por metamorfismo de la facies de los esquistos verdes, a diferencia de las del Grupo Carichapo que varían entre la facies de los esquistos verdes y la anfibolita (MENÉNDEZ, 1.972).

Formación Los Caribes: BENAİM (1.972) propone este nombre para designar una secuencia de rocas metamórficas cuya litología más distintiva son filitas y metareniscas rojas y metaconglomerados polimícticos, cuyas secciones tipo se encuentran en el río Cuyuní, en el sector comprendido entre la Isla Bogarín y un punto 3 km aguas abajo de la desembocadura del río Botanamo. Los contactos con las otras formaciones se han determinado en el mapa aeromagnético, donde se destaca con un cuerpo de 20 km de extensión en sentido este-oeste, anchura máxima de 3,7 km al oeste y mínima de 2 km al este.

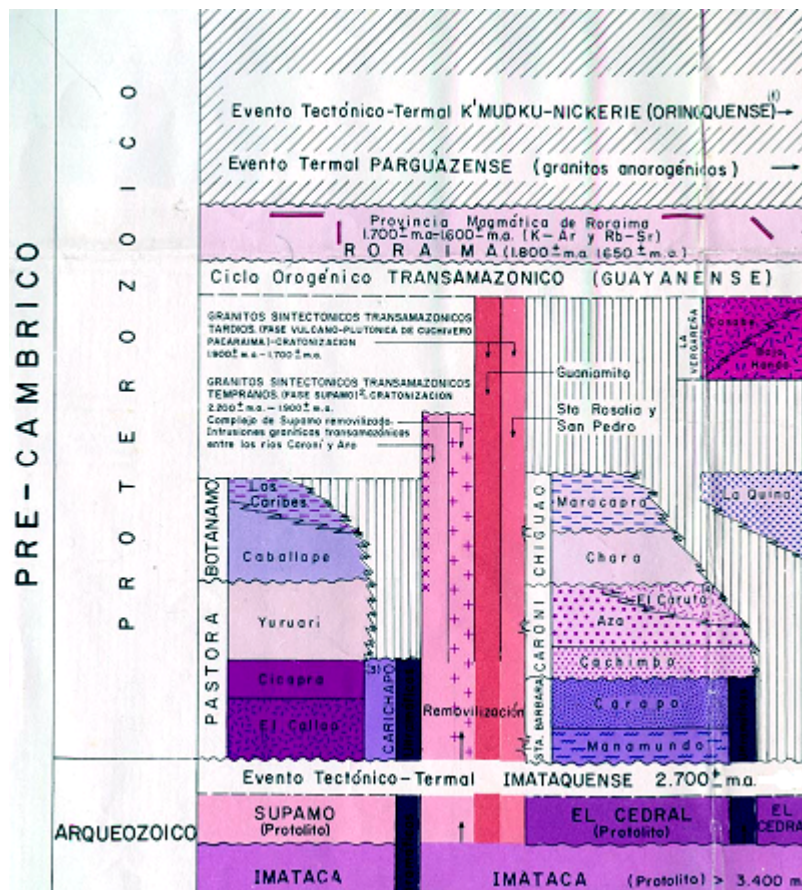


Figura 8. Columna Estratigráfica del área de estudio.

2.3- GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El patrón estructural que rige a la secuencia supracortical en la Provincia Geológica de Pastora, se caracteriza por presentar pliegues isoclinales recurrentes que se ubican en los espacios sinclinoiales entre los arqueamientos dómicos de esta secuencia, (ASCANIO *ET AL.*, 1.984). La secuencia supracortical de la Provincia Pastora ha sido agrupada o diferenciada de acuerdo a su edad, en un grupo de rocas más jóvenes (Grupo Botanamó) y un grupo de rocas más antiguas (Supergrupo Pastora), que además se diferencian por su estilo tectónico. Estas secuencias tienen las características de los denominados Cinturones de Rocas Verdes (CRV).

Estos cinturones están asociados a domos graníticos y gnéisicos los cuales fueron deformados y mineralizados por la orogénesis Transamazónica, hace alrededor de unos 2600-2300 Ma (MENDOZA, 1.973; GIBBS, 1.979). Existe uniformidad de criterios acerca de la ocurrencia de una deformación polifásica en los Cinturones de Rocas Verdes. Varios autores (GIBBS, 1.979; CONDIE, 1.981) coinciden en que al menos existieron dos o más eventos de deformación, de los cuales uno es el causado por el emplazamiento diapírico de masas de granitos dentro de las secuencias volcano-sedimentarias.

En la Provincia de Pastora hay presencia de estructuras mayores (de gran tamaño), así como también estructuras menores. Entre las estructuras de gran tamaño perteneciente a la Provincia de Pastora encontramos: 1) arqueamientos dómico granítico-gnéisico-migmatíticos; 2) cubetas sinclinoideas y pliegues asociados en la secuencia volcano-sedimentaria, y 3) fallas.

1) Arqueamientos dómicos: Son las estructuras de mayor extensión en la Provincia de Pastora, entre los cuales se encuentran los arqueamientos dómicos de Caiguao y El Manteco, (MENÉNDEZ, 1.972). Estos incluyen dos o más domos graníticos, en sus partes marginales. A unos 35 km de la Piedra de Supamo en dirección noreste, se encuentran otros arqueamientos dómicos más pequeños, cuyo patrón de fracturamiento es noreste y noroeste, predominando la primera tendencia. BENAÏM (1.972) sugiere que tales direcciones de fracturamiento son el resultado del enfriamiento de estas masas de magma que intrusieron los Cinturones de Rocas Verdes (CRV).

2) Cubetas sinclinoideas y pliegues asociados: La complejidad de los patrones de deformación y la escasa ocurrencia de los afloramientos no ha permitido definir claramente el patrón de plegamiento, ya que los Cinturones de Rocas Verdes son flexuras muy complejas, en forma de sinclinorios, acomodados entre los arqueamientos y/o domos graníticos-gnéisicos que los rodean; sin embargo, siempre

se ha reconocido en un Cinturón de Rocas Verdes típico dos fases de plegamientos: una de ellas relacionada con el emplazamiento diapírico de masas graníticas. CONDIE (1.981), MENÉNDEZ (1.973) y GIBBS (1.979) lograron distinguir dos o más fases de plegamiento en la regiones de Guayana y Guasipati-El Callao, respectivamente.

Los pliegues generados durante la primera fase son pliegues isoclinales y recurrentes, MENÉNDEZ (1.972). Estos pliegues son de influencia regional y afectan principalmente a las unidades basales de la Provincia de Pastora (Grupo Carichapo). MENÉNDEZ (1.972), en la región de Guasipati-El Callao, definió que el cuadro estructural del Supergrupo Pastora está conformado por tres sinclinorios mayores, entre los cuales se encuentran, los arqueamientos dómicos de El Manteco, Caigua y Guasipati-El Miamo, con tendencia estructural N 10° W y declive sureste; un segundo con rumbo N 70° E y declive al suroeste, situado a oeste de la región de Guasipati-El Callao; y un tercer sinclinorio con rumbo N 30° E y declive al noreste, situado entre los arqueamiento dómicos de El Manteco-Caiguao.

3) Fallas: Los Cinturones de Rocas Verdes (CRV) presentan a nivel mundial, fallas de distintos tipos y edades. En la región de Guasipati-El Callao y en las áreas situadas inmediatamente al sur y al norte de esta región los patrones de lineamientos, los cuales representan uno o varios patrones de fallamiento, están asociados a unidades litológicas específicas. Los patrones de lineamiento de tendencia noreste se asocian a la unidad basal de la Provincia de Pastora (Grupo Carichapo); mientras que el patrón de fallamiento noreste está litológicamente relacionado con la unidad más joven de esta misma Provincia (Grupo Botanamo).

Las estructuras menores reportadas para rocas de la Provincia de Pastora son foliaciones, lineaciones de diversos tipos y diaclasas.

2.3.1- EVOLUCIÓN TECTÓNICA DEL ESCUDO DE GUAYANA

El Escudo de Guayana se extiende a través de Guayana Francesa, Suriname, Guyana, Venezuela, Colombia y Brasil. La parte venezolana del Escudo de Guayana constituye su expresión septentrional y difícilmente se podría, con base en su estudio, tratar de establecer una historia tectónica que englobe todos los procesos que intervienen durante la evolución del escudo como unidad geológica. A los fines de este estudio se presenta en forma resumida como fue el desarrollo del Escudo de Guayana en el territorio venezolano y los tipos de rocas que allí afloran.

Rocas Graníticas

Las rocas graníticas de la Guayana Venezolana, de acuerdo a su composición química, petrografía y estudios radiométricos, pueden clasificarse en cuatro grupos principales, según GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.* (1.980).

- Rocas graníticas foliadas ricas en K₂O (> 4%) de edad comprendida entre 2700 Ma y 3600 Ma.
- Rocas graníticas masivas a foliadas, pobres en K₂O (< 2%), con edades entre 3000 Ma y 2200 Ma.
- Rocas graníticas poco foliadas, ricas en K₂O (> 4%), de edad entre 2000 Ma. y 1700 Ma.
- Rocas graníticas post-tectónicas, ricas en K₂O (> 5%), con edades comprendidas entre 1600 Ma. y 1300 Ma. (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

Los granitos del primer grupo son rocas gnéissicas, foliadas a masivas, metamorfizadas y asociadas a rocas granulíticas y anfíbolíticas, las cuales presentan afinidades químicas con rocas calco-alcálinas y de acuerdo a sus relaciones isotópicas es posible que representen rocas derivadas de procesos de fusión parcial de la parte superior del manto. Dentro de este conjunto granítico se distinguen gneises

graníticos, gneises félsicos y charnockitas, todos ellos dentro de la provincia de Imataca. Su edad puede ser tan antigua como 3600 Ma. o tan joven como 2700 Ma. (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

Los granitos del grupo 2 son rocas masivas a foliadas, que forman cuerpos dómicos ensanchados contra apretados sinformes de “rocas verdes”. Dentro de este grupo se distinguen varios tipos de roca, como son tonalitas, granodioritas y trondhjemitas o “granitos sódicos”; en este conjunto se encuentran las rocas del Complejo Supamo. Además se localizan rocas graníticas con contenidos altos a moderados de K₂O que pudieran representar removilización de los “granitos sódicos” ocurrida al final de la Orogénesis pre-Transamazónica (2400 Ma – 2200 Ma). Las rocas graníticas de este conjunto están metamorfizadas al nivel de las facies de los esquistos verdes a anfibolita epidótica. Sus edades radiométricas son pobremente conocidas y aparentemente registran varios períodos de removilización durante las diferentes orogénesis (> 3000 Ma, 2600 Ma, 2200 Ma). (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

Las rocas graníticas del grupo 3 son rocas masivas a foliadas, con bajo contenido de Niquel y Cobalto. Estas rocas están metamorfizadas a las facies de los esquistos verdes, parte inferior. Dentro de este grupo se distinguen varios tipos que llegan a constituir una serie ígnea ácida completa: granitos biotítico-hornbléndicos (plutónicos), granitos biotíticos (hipoabisales), granitos leucocráticos o alaskíticos (subvolcánicos), rocas riolíticas intrusivas, extrusivas y piroclásticas. Todo este conjunto corresponde al Grupo Cuchivero y a los granitos jóvenes de 1700 Ma a 1900 Ma (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

Los granitos del grupo 4 son rocas masivas, post-tectónicas, localmente recrystalizadas, pero aparentemente no metamorfizadas. Generalmente son ricos en minerales máficos como biotita, hornablenda y piroxenos. Dentro de este grupo encontramos, los granitos rapakivi del Parguaza. Estos granitos contienen xenolitos

muy variados, como riolitas, granitos biotíticos, metagabros, anortositas y rocas sedimentarias, y están cortados por aplitas, pegmatitas ricas en turmalina y granitos leucocráticos de grano fino y de edad posterior, o ligeramente posterior, al emplazamiento de los rapakivi del Parguaza. Las edades varían entre 1690 Ma y 1500 Ma. (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

En síntesis podemos mencionar que en la Guayana venezolana se distinguen cuatro tipos principales de rocas graníticas.

1. Gneises graníticos del Complejo Imataca (3600 Ma – 2700 Ma)
2. Granitos Sódicos del Complejo Supamo (3000 Ma – 2200 Ma)
3. Granito del Grupo Cuchívoro (alrededor de 1900 Ma)
4. Granitos post-tectónicos de Parguaza (1600 Ma – 1500 Ma).

Las rocas graníticas del Complejo de Imataca presentan afinidades químicas con los granitos del Parguaza, ambos tipos con tendencia tholeítica de fraccionamiento. La relación de K_2O/Na_2O aparentemente se mantuvo constante desde aproximadamente los 3600 Ma hasta los 1500 Ma, es decir, que quizás no hubo un engrosamiento mayor en la corteza terrestre (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

Los granitos del Complejo de Supamo presentan relaciones bajas K_2O/Na_2O , lo cual sugiere que se formaron en una corteza relativamente delgada. Las relaciones Rb – Sr en estos “granitos sódicos” sugieren que de acuerdo al modelo de CONDIE (1973), debieron emplazarse o formarse en una corteza terrestre cuyo espesor no debió exceder los 20 km.

Edades Radiométricas

HURLEY *ET AL.* (1.973) realizaron un análisis de la mayor parte de las edades aparentes determinadas en la región de Guayana, a fin de agruparlas en conjuntos más

o menos coherentes que pueden ser representativos de los principales eventos tectotermiales. Los autores hacen notar que es importante tomar en cuenta tanto el escaso número de determinaciones de edad, como la gran variabilidad de rocas existentes. Los principales eventos se indican a continuación de más antiguo a más joven:

Evento Guriense: Los análisis realizados por el método Rb/Sr en roca total revelan edades que oscilan entre 3000 – 3600 Ma, las edades más antiguas detectadas en el Escudo de Guayana. Las determinaciones se efectuaron en granulitas y pueden corresponder a la edad del protolito de Imataca.

Evento Imataca: Este evento está representado en las rocas que afloran al norte de la falla de Guri cuyas edades fueron determinadas entre 2700 – 3400 Ma. El evento Imataca es considerado por MORENO ET AL.(1.977) como el generador de la serie de rocas graníticas de carácter sódico agrupadas en el denominado Complejo de Supamo, formado entre 2600 – 2700 Ma, al sur de la falla de Guri. Como se mencionó al describir el Complejo de Supamo, MORENO y MENDOZA (1.975) incluyen en él las rocas graníticas sódicas, así como las franjas migmatíticas y gnéisicas estrechamente asociadas a las primeras. Este evento quedó impreso en las rocas del Complejo Imataca, como lo demuestra una serie de determinaciones Rb/Sr en roca total que han dado persistentemente una edad de 2800 Ma. Otras determinaciones en rocas graníticas sódicas por el método U/Pb en circones han dado una edad de 2820 Ma.

Evento Pre-Transamazónico: La edad K/Ar de 2100 Ma, registrada en biotita en las trondhjemitas de Guri indica un evento termal producido por rocas que cristalizaron próximas a ellas, como son los granitos potásicos o granitos jóvenes, que fueron fechados en 2100 Ma por el método Rb/Sr en isócronas de roca total. Esta edad ha sido determinada en varios cuerpos intrusivos de composición química y mineralógica similar a las rocas potásicas del tipo Granodiorita de San Pedro de las Bocas de 2100 Ma y el Granito de la Encrucijada de 2100 ± 87 Ma y 2100. El

calentamiento producido por las rocas graníticas potásicas mencionadas, que cristalizaron en la etapa pre-Transamazónica de aproximadamente 2000 – 2100 Ma, también ha sido detectado por el método K/Ar en diversas regiones del Escudo de Guayana. (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

Evento Transamazónico: Este evento ha sido registrado en la Provincia de Cuchivero o Amazonas. La probable edad de formación de las rocas de esta provincia se basa en determinaciones Rb/Sr en isocronas de roca total de 1875 Ma para el Granito de Santa Rosalía, 1875 Ma para el Granito de San Pedro y 1740 Ma Rb/Sr en isócronas de roca total para el Granito de La Paragua, ubicado unos 300 km al sureste de la región de Cuchivero. (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

Evento Parguazense: Este evento está representado en Venezuela por las rocas del Grupo Suapure, o sea el Granito del Parguaza y su facies de borde o Granito de Los Pijiguaos. Mediante determinaciones Rb/Sr en isócronas de roca total y U/Pb se considera que registra un intervalo de edad entre 1400 – 1600 Ma. (GONZÁLEZ DE JUANA *ET AL.*, 1.980).

2.3.2- EVOLUCIÓN TECTÓNICA DE LOS CINTURONES DE ROCAS VERDES

La información producida durante los últimos 15 años y la variedad de datos obtenidos acerca de estos terrenos del Precámbrico, ha generado bastante contraste en la interpretación acerca de la génesis de los CRV, en consecuencia es poco posible un único modelo que explique el origen de los mismos.

Modelos Propuestos

Entre algunos de los modelos tectónicos que explican la formación de los cinturones de rocas verdes, se hallan los presentados por WINDLEY (1.978). Éstos incluyen comparaciones de los Cinturones de Rocas Verdes con las ofiolitas recientes, y los sedimentos tardíos de los CRV, son comparados con el flysch de los geosinclinales. Otros sugieren que los CRV fueron desarrollados sobre corteza continental en áreas de “rifting” o grandes geofracturas. Algunos modelos visualizan una subsidencia vertical de componentes volcánicos de alta viscosidad y ascenso simultáneo de componentes graníticos menos densos. Los intentos más recientes aplican la teoría de la tectónica de placas, a las situaciones del Arqueano, y comparan las secuencias volcánicas de los CRV con la asociación de los arcos de islas modernos.

BRICKLE (1.978) indica que el alto flujo de calor en el Arqueano pudo haberse disipado producto de una subducción acelerada de la litósfera oceánica, lo cual da indicios de que la tectónica de placas pudo funcionar en el Arqueano. Estas subducciones de litósfera jóvenes y calientes, fueron rápidas con respecto a las modernas.

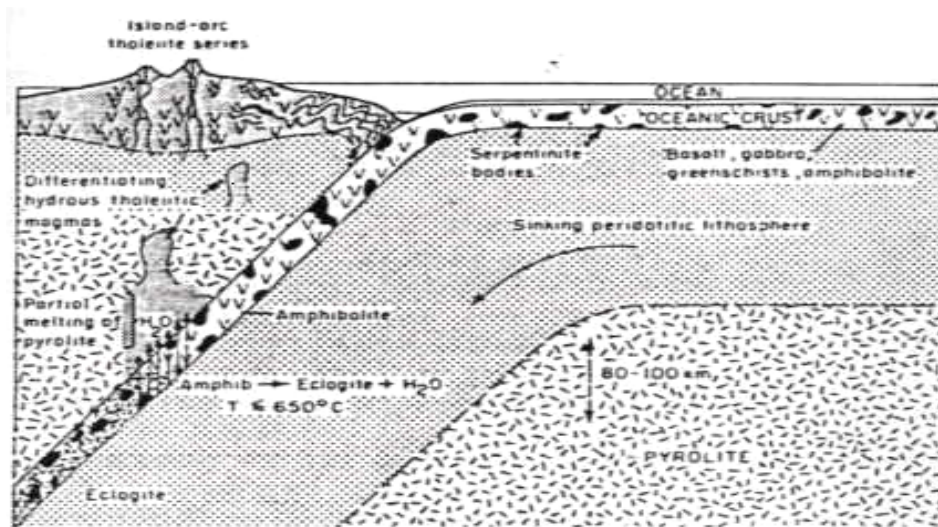
Las komatitas, ricas en MgO, son muy comunes en el Arqueano pero ausentes en el Proterozoico y estratos subsecuentes, fueron eruptadas a una temperatura de 1650 °C, mediante un alto grado de fusión parcial del manto, consecuencia de un alto flujo de calor existente. CAMPBELL Y JARVIS (1.984) indican que estas rocas komatíticas no pudieron fundirse en un ambiente de subducción, por tal razón se infiere que fueron la fuente de los primeros componentes de la corteza continental. La ausencia de corteza continental pre 4000 Ma., se explica por la presencia de corteza komatítica durante el Arqueano temprano. Con el paso del tiempo el flujo de calor descendió, dando origen a magmas tholeiíticos, generados por moderados porcentajes de fusión parcial del manto superior.

El modelo de RINGWOOD (1.974) se basa en la relación existente entre la localización de los volcanes con respecto a la zona de Benioff. Este autor propone dos fases (figura 9); la primera una fase temprana tholeítica (superficial) y la segunda una fase tardía calcoalcalina (profunda). La fase temprana alcanza entre 80–100 km de profundidad y no excede los 650–700 °C, donde se produce la transformación de anfibolita en eclogita más agua. A profundidades mayores, debido al aumento de la temperatura, la corteza oceánica se transforma en cuarzo-eclogita a unos 750 °C y con la presión de agua liberada por la deshidratación de la serpentinita, esta corteza eclogitizada se funde produciendo magmas riodacíticos-riolíticos en el intervalo de 100-150 km de profundidad. Estos magmas no logran alcanzar la superficie pues son sobresaturados e interactúan con la peridotita granatífera de la cuña de manto por encima de la placa subducida, generando piroxenita granatífera. Estas piroxenitas hidratadas ascienden diapíricamente y generan magmas calco-alcalinos que se fraccionan por cristalización de eclogita, anfíbol, ortopiroxeno y plagioclasa, formando así una secuencia calcoalcalina.

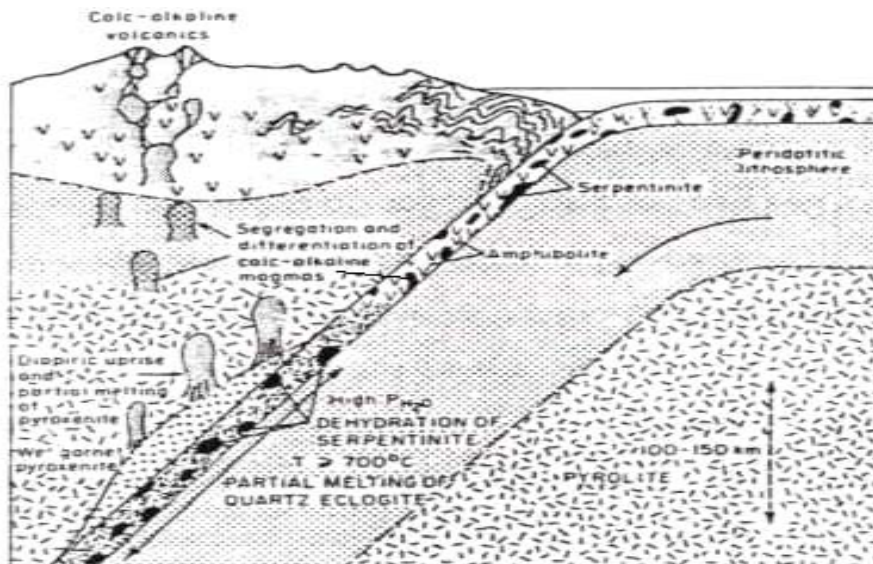
MARTIN (1.986) indica que por ser más caliente la litosfera subducida durante el Arqueano la fusión ocurre antes; sus cálculos geoquímicos le permiten inferir que el magma calcoalcalino generado se produce por fusión directa de la corteza oceánica subducida a menor profundidad.

ANHAEUSSER (1.982) resume la evolución de las asociaciones granito-CRV, indicando que las secuencias tempranas generalmente tienen desarrollos de rocas máficas y ultramáficas, estas últimas comprenden basaltos ricos en Mg y peridotitas, komatitas y basaltos tholeíticos. Debido a que el ambiente es dominado por condiciones volcanogénicas, se producen condiciones favorables para la generación de cantidades menores de rocas volcánicas félsicas, material piroclástico, así como también la depositación de formaciones bandeadas de hierro, rocas calco-silíceas, cherts bandeados y grauvacas. Luego ocurren cambios químicos que se caracterizan

por la producción de grandes cantidades de magma thondjemíticos o tonalíticos, derivados de la fusión parcial de una litosfera primitiva encimática.



(a)



(b)

Figura 9. Evolución de un arco de Islas. (a) Fase temprana. Comprende la deshidratación de la anfibolita, introducción de agua en el manto pirolítico y generación del magma de una serie tholeítica. (b) Fase tardía. Comprende la fusión parcial de la corteza oceánica que se subduce, y la reacción de los líquidos con el manto por encima de la zona de Benioff. Produciendo el ascenso de diapiros con magmas de tipo calcoalcalinos. (Tomado de RINGWOOD, 1.974).

2.4- RECONOCIMIENTO GEOLÓGICO DE LA ZONA DE ESTUDIO

La fase de campo se llevó a cabo durante los días 23 al 27 de noviembre de 2003, ésta consistió en recorrer parte de la zona correspondiente al área que abarca el proyecto en conjunto, ubicada entre los poblados de San Isidro, El Manteco, El Callao, Guasipati y Tumeremo. Durante esta fase se recolectaron 13 muestras de rocas pertenecientes a las distintas formaciones que afloran en el Escudo de Guayana, las cuales fueron sometidas a estudios de laboratorio para determinar: el tipo de roca y composición mineralógica a través de secciones finas, analizadas bajo la inspección de los profesores Sebastián Grande y Ricardo Alezones. También fue posible determinar las densidades y susceptibilidades magnéticas de las muestras, información de mucha ayuda para obtener la interpretación geológica - geofísica que se persigue con este proyecto. A continuación se describen las características antes mencionadas


Afloramiento N°1

En este afloramiento ubicado en las coordenadas $7^{\circ} 56' 21.5''$ N y $62^{\circ} 17' 54.3''$ W, se encontraron dos litologías distintas con presencia de diaclasas rellenas de carbonato, debido a procesos hidrotermales. Aproximadamente existen siete grupos de diaclasas con rumbo E-W y buzamiento 51° N; conjugada, rumbo N-S y buzamiento 10° S. La muestra se encuentra bastante meteorizada y contiene mucho óxido.



Figura 11. Afloramiento en la vía que comunica a Upata con Guasipati. ($N70^{\circ}$ E dirección de la vista fotográfica).

Tabla 2. Cuadro descriptivo de las muestras tomadas en el afloramiento n° 1.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
	Anfibolita	Cuarzo, plagioclasa, hornblenda, apatito, epidoto. La sección tiene una veta de cuarzo intercalada.	Anfibolita / grado medio	Pastora / Caballape	0.000231076 / 2.90 gm/cm ³
	Cuarcita Magnetítica	Anfiboles, piroxenos, mucho cuarzo y presencia de un alto porcentaje de magnetita.	Anfibolita / grado alto	Imataca	0.002505625 / 3.43 gm/cm ³
2					

Afloramiento N° 2

Afloramiento ubicado dentro de la Cantera Pedeca, en las coordenadas 7° 52' 47"



; presencia de regolitos, pequeños bloques limitados por diaclasas.

Se considera que podría ser una metagrauvaca. Se considera que el

dentro del grupo Carichapo, porque existen metareniscas y

posición silicea). Estos afloramientos se usan para agregados de

asfalto y para la construcción.




Figura 12. Afloramiento de Rigolitos dentro de la Cantera Pedeca. (N20°E N dirección de la vista fotográfica).



Figura 13. Familia de diaclasas presente en el afloramiento. (N20°E dirección de la vista fotográfica).

Tabla 3. Cuadro descriptivo de las muestras tomadas en el afloramiento n° 2.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
 3	Anfibolita	Actinolita, epidoto, presencia de minerales opacos y esfena	Esquistos verdes /	Provincia de Pastora /	6.38046E-05 /
			grado bajo	Grupo Carichapo	2.90 gm/cm ³
4	Anfibolita	Cuarzo, actinolita, plagioclasa y epidoto. La muestra es de grano grueso	Esquistos verdes /	Provincia de Pastora /	3.62134E-05 /
			grado bajo	Grupo Carichapo	3.01 gm/cm ³


Afloramiento N° 3

El afloramiento presenta un grado de meteorización muy alto y está ubicado en las coordenadas 7° 48.391' N y 61° 58.641' W. A simple vista parece una tronhjemita meteorizada de color blanco con manchones color naranja, color debido a la presencia de óxido de hierro. Sobresalen vetas de cuarzo.



Figura 14. Afloramiento en la vía de Guasipati. (E-W dirección de la vista fotográfica).

Tabla 4. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 3.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
 5	Meta - trondjemita	Cuarzo, microclino, plagioclasa, biotita y algo de hornblenda.	Esquistos verdes a anfibolita	Pastora	0.000106916
			/ grado medio	/ Complejo Supamo	/ 2.65 gm/cm ³

Afloramiento N° 4

En este afloramiento ubicado en las coordenadas 7° 44.156' N y 61° 58.201' W es posible observar foliación con rumbo N20°E y buzamiento 30° N. Hay presencia de pliegues con rumbo N20°E y buzamiento 22° N (figura 16), es decir buzamiento leve al norte. Presencia de cuarzo con brillo craso, lo cual puede ser debido a las multitudes inclusiones fluidas.




Figura 15. Afloramiento en la vía de Guasipati - El Callao. (N60° E dirección de la vista fotográfica).



Figura 16. Pliegue recurrente presente en el afloramiento. (N60° E dirección de la vista fotográfica).

Tabla 5. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 4.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
	Gneis Plagioclásico	Plagioclasa, presencia de anfíbol (hornblenda), epidoto y esfenas grandes.	Anfibolita / grado medio	Pastora / Complejo Supamo	3.4489E-05 / 2.75 gm/cm ³
6					

Afloramiento N° 5

Este afloramiento se encuentra muy meteorizado y está ubicado en la entrada de El Callao en las coordenadas $7^{\circ} 21.264' N$ y $61^{\circ} 49.482' W$. Intercalaciones de tobas con metapelitas. La parte oscura del afloramiento son intercalaciones de metatobas andesíticas, hay otra parte que es arenosa y tiene presencia de metareniscas o metachert. Existen bandeamientos de sericita. La muestra tomada en este afloramiento no pudo ser sometida a los análisis por estar muy meteorizada.



Figura 17. Entrada de El Callao. (N25° E dirección de la vista fotográfica).

Afloramiento N° 6

El afloramiento está ubicado en las coordenadas $7^{\circ} 21.330' N$ y $61^{\circ} 39.937' W$, y pertenece al Complejo Supamo; los afloramientos de Supamo son pequeñas crestas que están muy meteorizadas. La muestra tomada en este afloramiento no pudo ser sometida a los análisis por estar muy meteorizada.



Figura 18. Afloramiento cerca del Hato La Nomada. (N20° E dirección de la vista fotográfica).


Afloramiento N° 7

Este afloramiento en la mina de San Isidro ($7^{\circ} 27'00''$ N y $63^{\circ} 20'03''$ W), específicamente a 12 km de Ciudad Piar, mina que es explotada por la empresa Ferrominera Orinoco. La muestra analizada no proviene directamente del afloramiento, es un canto rodado.



Figura 19. Afloramiento En la Mina San Isidro. (No fue posible tener la dirección de la vista fotográfica).

Tabla 6. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 7


Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
	Anfibolita (foliación casi perfecta)	Hornblenda, feldespato, cuarzo, epidoto (poco), presencia de minerales opacos; óxido de hierro.	Anfibolita / grado medio	Imataca	5.69068E-05 / 3.03 gm/cm ³

Afloramiento N° 8

Afloramiento de cantos de meteorización esferoidal, ubicados en las afuera de las oficinas de Ferrominera Orinoco en Ciudad Piar ($7^{\circ} 34'07''$ N y $63^{\circ} 15'16''$ W). La

roca se caracteriza por presentar distintas estructuras, debido a su apariencia podemos decir que meteoriza igual que un granito.

Tabla 7. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 8.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
	Roca Granítica	Feldespato, biotita (producto de la alteración del ortopiroxeno), plagioclasa, microclino, bastante cuarzo. Presencia de Hipersteno.	Anfibolita	Imataca	0.000408695
	Charnockita Félsica		/		grado medio
					2.74 gm/cm ³

Afloramiento N° 9

En este afloramiento se encuentra ubicado en las cercanías del embalse de Guri (7° 46'13" N y 62° 58'43" W), aquí es posible observar una millonita de falla (figura 20), la cual representa el contacto entre las Provincias de Pastora e Imataca y tiene una orientación N 85° E.




Figura 20. Embalse de Guri. (N18°W dirección de la vista fotográfica).

Afloramiento N° 10

Afloramiento ubicado en la vía Upata-El Manteco (7°20 '20" N y 62° 35'10" W).
Presencia de posible esquistos clorítico, se considera una metavolcánica perteneciente al cinturón de rocas verdes.


Tabla 8. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 10.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
	Anfibolita epidótica	Anfibol verde - azul,, plagioclasa, poco cuarzo y epidoto.	Anfibolita epidótica / grado bajo – medio	Pastora / Grupo Carichapo	3.10401E-05 / 2.90 gm/cm ³
9					

Afloramiento N° 11

Afloramiento de posible metaígneas, ubicado en la vía El Manteco - El Callao (7°20 '17" N y 62° 35'52" W).

Tabla 9. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 11.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
	Metatronhjemita muy foliada	Cuarzo, feldespato potásico, plagioclasa, biotita y apatito como accesorio. Muestra con cristales muy grandes.	Esquistos verdes / grado bajo	Pastora / Complejo Supamo	0.001032945 / 2.7 gm/cm ³


Afloramiento N° 12

Afloramiento de domos, los cuales tienen a su alrededor presencia de pisolitas de goethita; ubicado vía El Manteco - El Callao (7°19 '22" N y 62° 22'40" W).



Figura 21. Afloramiento vía El Callao. (N20°E dirección de la vista fotográfica).


Tabla 10. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 12.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
	Granodiorita	Feldespato potásico, cuarzo, plagiclasa, biotita, clorita. Presencia de esfena.	Esquistos verdes	Pastora	0.000112089
			/	/	/
11			bajo grado	Complejo Supamo	2.8 gm/cm ³

Afloramiento N° 13

Afloramiento vía El Callao (7°18 '48" N y 61° 54'34" W), presencia de una metalava andesítica, perteneciente a la Formación El Callao.

Tabla 11. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 13.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Mineralógica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
	Metalava Andesítica	Actinolita, plagioclasa y esqueletos de piroxeno alterado a esfena.	Esquistos verdes	Pastora	4.48357 E-05
	(Roca Volcánica)		/	/	/
			grado bajo	Formación El Callao	3.09 gm/cm ³

Afloramiento N° 14

Afloramiento muy meteorizado en la vía a El Callao (7°20 '48" N y 61° 50'24" W), se observa presencia de pirita de tamaño representativo, pseudomorfizada a goethita.



Figura 22. Afloramiento vía El Callao. (Dirección de la vista fotográfica perpendicular a la carretera).



Tabla 12. Cuadro descriptivo de la muestra tomada en el afloramiento n° 14.

Foto de la muestra n°	Nombre de la muestra	Descripción Petrográfica	Facies/ Metamorfismo	Provincia/ Unidad	Susceptibilidad Magnética/ Densidad
13	Metatoba	Cuarzo, feldespato, biotita (un poco alterada) y epidoto en poca cantidad. La muestra está bastante foliada	Esquistos verdes / grado bajo	Pastora / Formación El Callao	2.41423E-05 / 2.7 gm/cm ³

3.- MARCO TEÓRICO

A continuación se presentan los conceptos básicos y fundamentales, asociados con los métodos magnéticos y gravimétricos de prospección geofísica.

3.1- MÉTODOS MAGNÉTICOS

Los Métodos Magnéticos tienen como principal objetivo la búsqueda de anomalías magnéticas, que se originan por las variaciones de propiedades magnéticas de las rocas subyacentes. Estas anomalías magnéticas dependen de factores como la geometría del cuerpo, la localización del cuerpo y la orientación del cuerpo respecto al campo terrestre, entre otros. La magnetometría como tal permite determinar:

1. Límites de Cuencas.
2. Profundidad de Basamento.
3. Lineaciones en el Basamento.

La Intensidad del Campo Magnético se define como la fuerza por unidad de polo que se ejerce, cuando un pequeño polo de fuerza P_o se coloca en dicho punto. Los polos magnéticos son los puntos a los cuales convergen líneas de fuerza; en el caso de una barra magnética, convergen a los extremos (figura 23). Por convención de polos el polo norte corresponde al polo positivo (+) de donde parten las líneas, mientras que el polo sur corresponde al polo negativo (-) a donde llegan estas líneas (DOBRIN Y SAVIT, 1.988).

La Tierra funciona como un magneto irregular, donde la mayor parte del campo geomagnético es producida por corrientes en el núcleo externo líquido (probablemente hierro), que estaría en movimiento debido a las corrientes convectivas (NETTLETON, 1.976).

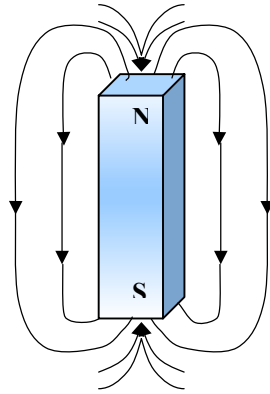


Figura 23. Líneas de fuerza entre los polos de una barra magnética, producidas por un campo magnético (Modificado de TELFORD *ET AL.*, 1.976).

El campo magnético de la Tierra en un punto de la superficie terrestre se define como un vector, el cual consta de una parte bipolar principal y de una componente secundaria no-bipolar, que no produce variaciones en el vector de campo total en la superficie terrestre. En consecuencia, el campo magnético no es constante y varía tanto en intensidad como en dirección. A continuación se muestran los elementos del campo magnético terrestre (figura 24).

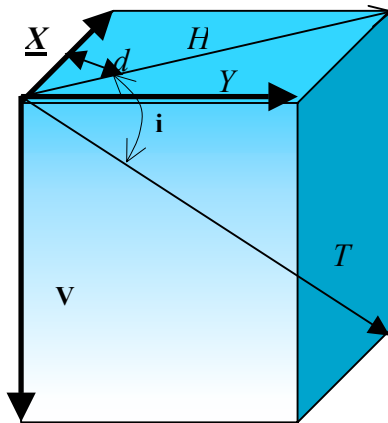


Figura 24. Elementos vectoriales del campo magnético de la Tierra (Modificado de NETTLETON, 1.976).

T representa la intensidad del campo magnético total, su inclinación i es el ángulo que forma el vector T con el plano horizontal, d es la declinación del campo; X, Y y V son las componentes norte, este y vertical del campo magnético respectivamente; y H

es la componente horizontal. En el sistema emu las unidades comúnmente utilizadas para el campo geomagnético son GAMMAS (1 gamma = 1 nanotesla = 10^{-5} gauss).

3.1.1- INTENSIDAD DE MAGNETIZACIÓN

La intensidad de magnetización se define como el momento magnético bipolar por unidad de volumen, el cual es el vector que usualmente tiene una dirección paralela al campo magnético.

En el sistema *CGS* la intensidad de magnetización (*M*) posee unidades de emu. En el *SI* las unidades son de amperios/metro y la relación es $1 \text{ emu} = 10^3 \text{ Am}^{-1}$. Las variaciones de la dirección del campo magnético respecto a la superficie de la Tierra ocasionan cambios en la naturaleza de la anomalía magnética.

El instrumental utilizado en los estudios geomagnéticos permite medir directamente el valor absoluto del campo magnético total, en condiciones de topografía real, por lo que el procesamiento de estos datos viene dado en tres etapas: correcciones por variación en tiempo, amarre al campo geomagnético de referencia internacional (IGRF) y filtraje (LOGACHEV Y ZAJAROV, 1.978).

Las continuas observaciones del campo magnético terrestre desde diferentes puntos y por más de 200 años, han comprobado que este campo no es constante; es decir cambia con el tiempo en intensidad, declinación e inclinación (SHARMA, 1.986). Los cambios del campo magnético con el tiempo pueden ser de dos tipos, variaciones lentas o seculares y variaciones rápidas o diurnas. Las variaciones diurnas del campo magnético terrestre se consideran variaciones de baja intensidad y se dividen en solares con un período igual a 24 horas solares; y lunares, con un período igual a 24 horas lunares, es decir un tiempo entre dos lunas consecutivas por el meridiano del lugar.

Las variaciones seculares son de alta intensidad y por largos períodos de tiempo (1-100 años); son producidas por el impacto sobre el campo magnético terrestre de las partículas cargadas procedentes del sol.

La corrección por IGRF (“International Geomagnetic Reference Field”) se utiliza para remover el contenido del componente de longitud de onda larga mediante un modelo matemático que genera el campo magnético total en cualquier punto. El modelo contiene coeficientes armónicos esféricos, derivados de observaciones y datos de satélites y es revisado cada cinco años.

El filtraje se realiza para obtener la mejor resolución señal/ruido, mediante filtros clásicos como paso alto y paso bajo, y otros no tan clásicos como coseno direccional entre otros.

3.1.2- MAGNETISMO EN LAS ROCAS

Las propiedades magnéticas de las rocas dependen en gran medida del contenido de minerales ferromagnesianos, debido a su fuerte carácter magnético y a su frecuente presencia en las rocas. La cantidad de minerales ferromagnesianos presente en una roca es por lo tanto un rasgo que se debe tomar en cuenta para predecir el carácter magnético de una roca particular o conjunto de rocas.

De acuerdo a las propiedades magnéticas, todos los materiales (elementos, compuestos, etc.) pueden ser clasificados en: diamagnéticos, paramagnéticos y ferromagnéticos:

Diamagnéticos: La presencia de un campo magnético externo puede modificar la órbita de los electrones, ejerciendo un efecto opuesto a este campo, lo cual produce una magnetización muy débil, que se refleja en una susceptibilidad negativa. Entre

los minerales con características diamagnéticas se encuentran el cuarzo y los feldespatos.

Paramagnéticos: Por definición todos aquellos materiales que no son diamagnéticos son paramagnéticos, y su susceptibilidad magnética es positiva. Los electrones producen un campo magnético al rotar en su propio eje que es diferente de cero cuando el campo magnético aplicado es cero.

Ferromagnéticos: El momento magnético de los átomos puede ser orientado debido a la agitación térmica sin que se cree por una fuente externa. Un material es ferromagnético cuando todos los “spins” se encuentran paralelos al material, cuando posee igual número de “spins” en direcciones opuestas es antiferromagnético, y cuando el número es desigual son ferrimagnéticos. Estos últimos son importantes en el magnetismo terrestre e incluyen magnetita (Fe_3O_4), ilmenita (FeTiO_3), pirrotita (FeS) y hematita (Fe_2O_3) (Nettleton, 1976).

Debido al campo magnético terrestre las rocas adquieren una magnetización inducida; algunas rocas presentan magnetización remanente o permanente. Son pocos los minerales magnéticos, pero las rocas contienen un mínimo de ellos; éstos son los que se toman en cuenta a la hora de determinar el tipo de magnetismo. Como una generalización, las amplitudes mayores en las anomalías magnéticas son producidas por rocas máficas ricas en magnetita (Fe_3O_4), esto debido también a la contribución casi nula de la columna sedimentaria (BONINI, 1.984).

3.1.3- SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA

La susceptibilidad magnética es un parámetro adimensional que se define como la capacidad que tiene un cuerpo de imanarse y puede expresarse como:

$$\mu = k H, k Z \text{ ó } k T$$

Donde: **H** es la componente horizontal del campo magnético.

Z es la componente vertical del campo magnético.

T es el vector resultante o total del campo geomagnético.

En muchos casos la susceptibilidad magnética depende sólo de la cantidad de minerales ferromagnéticos como la magnetita. Ésta se considera una característica importante para detectar un yacimiento, debido a la diferencia de susceptibilidad magnética entre la roca de interés y la encajante.

3.2- MÉTODOS GRAVIMÉTRICOS.

En la Prospección Gravimétrica se miden las pequeñas variaciones que ejercen las rocas en la atracción gravitatoria emplazadas en los primeros kilómetros por debajo de la superficie del suelo. Estas variaciones de gravedad son utilizadas en Geofísica para interpretar el comportamiento de las estructuras que conforman el subsuelo, es por ello que los levantamientos gravimétricos se realizan con el fin de obtener la estructura geológica más probable del mismo. Es importante saber que los diferentes tipos de rocas tienen densidades diferentes y las rocas más densas ejercen mayor atracción gravitacional.

El contraste de densidades permite observar el límite entre las rocas sedimentarias y las rocas ígneas (basamento), así como también determinar las dimensiones de estructuras geológicas presentes en el subsuelo mediante el *modelaje gravimétrico*.

Cuando el geofísico realiza mediciones de gravedad obtiene mediciones relativas (no absolutas), las cuales permiten obtener la diferencia Δg existente entre el punto de observación y otro tomado como base. A esa diferencia observada se le deben aplicar

algunas correcciones, para así obtener los valores de “anomalías”, los cuales van a proporcionar información acerca de los cambios o contrastes de densidades en el subsuelo.

Las correcciones que se le realizan a las lecturas de gravedad obtenidas de los gravímetros son las siguientes:

Corrección por Mareas: Los instrumentos de medida de gravedad para prospección geofísica son tan sensibles que responden a la atracción gravitatoria del sol y de la luna, y registran variaciones periódicas de esta atracción debidas a los movimientos de la Tierra con respecto a estos cuerpos. Las aguas de la Tierra que carecen de rigidez, se levantan o bajan periódicamente obedeciendo a estas fuerzas; estos cambios se conocen como mareas. La Tierra misma sufre la acción de estas fuerzas de marea, y como no es infinitamente rígida, su superficie sólida se deforma de la misma manera que la superficie libre del agua, aunque por supuesto, no con la misma magnitud. Sin embargo, este movimiento origina cambios en la gravedad, pequeños pero medibles. La magnitud de la variación depende de la latitud, el día del mes y la época del año, pero el ciclo completo de marea no origina un cambio de gravedad mayor de 0.2 o 0.3 miligales.

Corrección por Deriva: El gravímetro, por que es un sistema mecánico, da lugar a lo que se llama deriva instrumental; es decir, que si se efectúan medidas sobre una misma estación a diversos intervalos de tiempo se obtienen valores ligeramente distintos. El valor de la deriva incluye también el efecto de marea.

Corrección de Aire Libre: Es la corrección aplicada debido a la altura h de la estación. Como las relaciones se hacen para calcular el valor que tendría a nivel del mar, habrá que sumar $0.3086h$ a la gravedad observada. Esta corrección compensa el efecto que genera la altura respecto al nivel del mar sobre la gravedad observada. Se expresa mediante la fórmula:

$$C_{AL} = 0.3086 \cdot h \text{ (mgal/m)}$$

El signo del resultado dependerá de si el punto medido se encuentra por arriba o por debajo del nivel de referencia que generalmente es el nivel medio del mar.

Corrección de Bouguer: Para hablar de corrección de Bouguer es necesario antes entender el concepto de anomalía gravimétrica, que es el resultado de relacionar la gravedad observada a la cual se le han aplicado una serie de correcciones, tomando como referencia el nivel medio del mar, con el valor teórico de la gravedad en un punto o estación determinada.

Para ello Bouguer determinó el “Factor de Corrección de Bouguer” el cual considera una lámina de altura h (siendo h la altura de la estación respecto al nivel del mar) de extensión infinita que delimita el nivel al cual se desea corregir y cuyo valor corresponde al obtenido mediante la aplicación de la fórmula:

$$CB = 0.04191 \rho_B \cdot h \text{ (mgal)}$$

De esta fórmula se infiere que la corrección de Bouguer compensa la atracción de la masa situada entre el nivel de referencia y la altura de la estación.

Corrección Topográfica: Las elevaciones cercanas a la estación originan una componente vertical de la atracción gravitatoria que contrarresta en parte la atracción hacia el interior del resto de la Tierra. Cuando hay depresiones por debajo de la estación, éstas corresponden a partes vacías de la lámina entre la estación y la superficie de referencia, que ocasionan una atracción menor en la estación que la que se tiene en cuenta por la corrección de Bouguer. Cuando las elevaciones o depresiones están lo suficientemente próximas a la estación es necesario corregir su efecto. Esta corrección consiste básicamente en calcular la atracción de la masa teórica necesaria para llenar las depresiones, la cual se suprimiría de las elevaciones

para aplanar la superficie. Para realizar ese proceso se utiliza el Método de HAMMER (1.939) que consiste en una graticula a la cual se le asignan valores de cotas según las curvas de nivel observadas en un mapa topográfico de la zona a la misma escala. Es importante destacar que las correcciones topográficas siempre se suman debido a que la atracción de las masas más altas se ejerce por encima de la estación y ésta es opuesta a la gravedad (DOBRIN Y SAVIT, 1.988).

Corrección por Latitud: Consiste en eliminar el incremento de la gravedad desde el ecuador hacia los polos en las mediciones de gravimetría. Esta corrección se aplica mediante el cálculo de la Gravedad Teórica GT:

$$GT = 978031.846 (1+0.005278895 \text{ Sen}^2\theta+0.00023462 \text{ Sen}^4\theta);$$

Donde, θ es la latitud de la estación de gravedad.

Todas estas correcciones se realizan para obtener los valores de anomalía de Bouguer de cada estación y obtener un mapa de isoanomalías correspondiente.

4.- VALIDACIÓN DE DATOS ESTADÍSTICOS Y ANÁLISIS GEOESTADÍSTICOS.

Es importante conocer que para el presente trabajo se contó con mapas aeromagnéticos, representados por las hojas NU-45, NU-46, NU-47, NV-45, NV-46 y NV-47, los cuales fueron realizados durante el período enero – mayo de 1.961, por Aero Service Corporatin de Venezuela. Estos mapas se elaboraron a escala 1:50.000 y los datos fueron tomados a una altura de 152 m. s. n. t. El intervalo entre curvas de Intensidad Magnética Total es de 20 gammas.

4.1- INTERPRETACIÓN ESTADÍSTICA

Una vez obtenida la base de datos, se realizó un análisis estadístico descriptivo a los mismos mediante el uso del programa SPSS v.7.0 (SPSS INC. 1.997), con el propósito de tener un mejor control de la calidad de los datos.

Entre las técnicas aplicadas a la variable de estudio encontramos el histograma de frecuencia, el cual es una respuesta gráfica de una frecuencia de distribución y es una de las vías más simples para analizar un conjunto de muestras. Por otro lado, las medidas de tendencia central y de dispersión permiten obtener información sobre las características de la distribución que poseen los datos.

Para la zona de estudio se trabajó con una base de datos magnéticos de 136.578 muestras; al realizar el histograma de frecuencia (figura 25), se observaron las siguientes características:

- La población de datos es unimodal, lo cual se debe a que la zona en su mayoría está compuesta por rocas ígneas de litología similar.
- La distribución de los datos se puede aproximar mediante una distribución normal.

- No existen valores fuera del rango, es decir todos los valores describen en su mayoría una misma litología.

En cuanto a los valores de tendencia central, se puede decir que el valor máximo es de 7020 gammas y el valor mínimo de 6180 gammas, una moda de 6500 gammas, una media de 6545,1248 gammas y una mediana de 6540 gammas, lo cual permite inferir que la distribución presenta simetría positiva (tabla 13). Las medidas de dispersión (tabla 14) arrojaron lo siguiente: una varianza relativamente pequeña de 13.549,407 gammas (los valores se concentran alrededor de la media) y una desviación estándar de 116,4019 gammas.

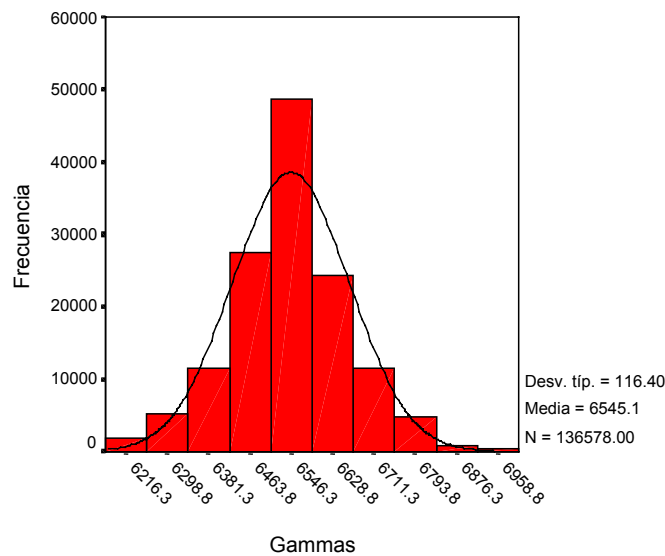


Figura 25. Histograma de Frecuencia de Intensidad Magnética Total.

Tabla 13. Valores de Tendencia Central de Intensidad Magnética Total.

Estadísticos

	N		Media	Mediana	Moda
	Válidos	Perdidos			
VAR00001	136578	0	6545.1248	6540.0000	6500.00

Tala 14. Valores característicos de los casos de Intensidad Magnética Total.

Resúmenes de Casos

Número de Casos	136578
Media	6545.1248
Mediana	6540.0000
Error típ. de la media	.3150
Mínimo	6180.00
Máximo	7020.00
Rango	840.00
Desv. típ.	116.4019
Varianza	13549.407
Curtosis	1.029
Error típ. de la curtosis	.013
Asimetría	-.087
Error típ. de la asimetría	.007

Tabla 15. Prueba de Kolmogorov–Smirnov para la variable de Intensidad Magnética Total, distribución de contraste, Normal.

Prueba de Kolmogorov-Smirnov para una muestra

		Z
N		1000
Parámetros normales ^{a,b}	Media	6546.2202
	Desviación típica	111.0840
Diferencias más extremas	Absoluta	.139
	Positiva	.100
		-.139
Z de Kolmogorov-Smirnov		4.385
Sig. asintót. (bilateral)		.000

a. La distribución de contraste es la Normal.

b. Se han calculado a partir de los datos.

Por otra parte fue posible analizar una muestra de la población total de datos, mediante el uso de la prueba K-S, la cual permite determinar el grado de ajuste a una distribución normal, basándose en las diferencias de porcentajes entre la distribución acumulada observada y la teórica. El contraste utilizado para esta prueba es el de una distribución normal (tabla 15), mediante éste fue posible determinar que la muestra procede de una población en la que la variable se ajusta a una distribución normal.

Para el análisis estadístico de los datos gravimétricos, se contó con una base de 1.882 datos del Estado Bolívar, éste se realizó con la finalidad de obtener una mejor información de la geometría del subsuelo. Mediante el histograma de frecuencia (figura 26) podemos observar, que existen más de dos poblaciones, por tal razón se dice que presenta una distribución multimodal, la distribución es sesgada a la derecha.

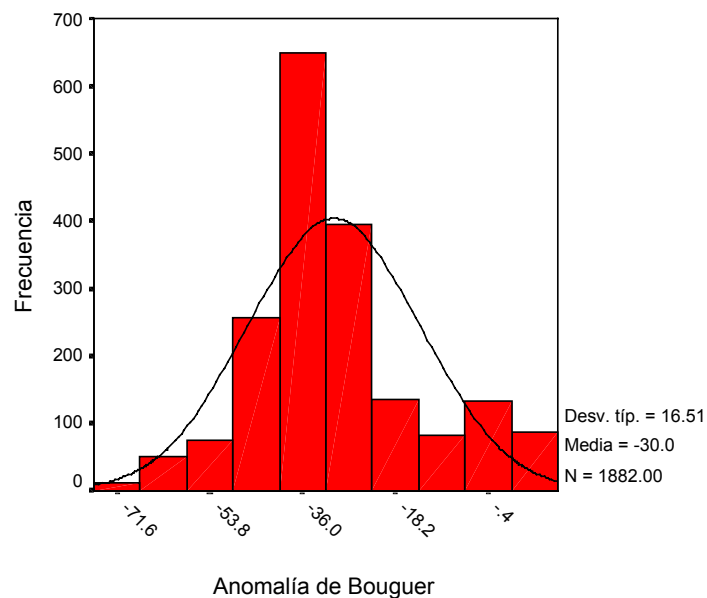


Figura 26. Histograma de Frecuencia de Anomalías de Bouguer

Tabla 16. Valores descriptivos de Anomalía de Bouguer.

	Máximo	Media	Mediana	Mínimo	Moda	Desviación típica	Varianza
AB	18.19	-29.95	-32.68	-138.52	-53.53	16.51	272.63

En la tabla 16 es posible observar que entre los datos gravimétricos el valor máximo de muestra es de 18.19 mgals y el mínimo de -138.52 mgals, la varianza es de 272.63 mgals; ésta se considera grande, debido a que los valores tienden a distribuirse lejos de la media. La desviación estándar presenta un valor de 16.51 mgals

4.2- INTERPRETACIÓN GEOESTADÍSTICA

Luego del análisis estadístico de los datos, se procedió a determinar la tendencia de las variables de estudio y las funciones que mejor simulen el comportamiento espacial de éstas, mediante un estudio geoestadístico.

Para el análisis geoestadístico de los datos se utilizó el programa GRIDSTATPRO (GRIDSTATPRO INC. 1.999), versión demo Octubre 2003, la cual permitió realizar el estudio del variograma experimental y teórico, así como la dirección de la elipse de anisotropía. Usando el programa GRIDSTATPRO (OP. CIT), se obtuvo que el variograma teórico con menor error de ajuste es el exponencial (6,12%); el modelo presenta un rango aproximado de 4.750 y una meseta de 11.000 m (figura 27). Es posible observar la presencia de una anisotropía geométrica, debido a que las direcciones de los ejes mayor y menor tienen la misma meseta para diferentes rangos. La elipse de anisotropía (figura 28) indica que la continuidad espacial posee un azimut de 173,12°, es por eso que se infiere que la zona de mayor variación tiene una dirección

aproximada N80°E; dirección que se confirma con la roseta de distribución espacial (figura 29). El eje mayor tiene un valor de 19.961 y el menor 6.987, la relación entre los dos radios es 0,3500.

Luego de hacer este análisis, se realizan los mapas de anomalía magnética usando el programa SURFER 6.0 (GOLDEN SOFTWARE INC.1996), bajo la técnica kriging, tomando en cuenta el azimut y la relación entre el radio menor y el mayor de la elipse de anisotropía.

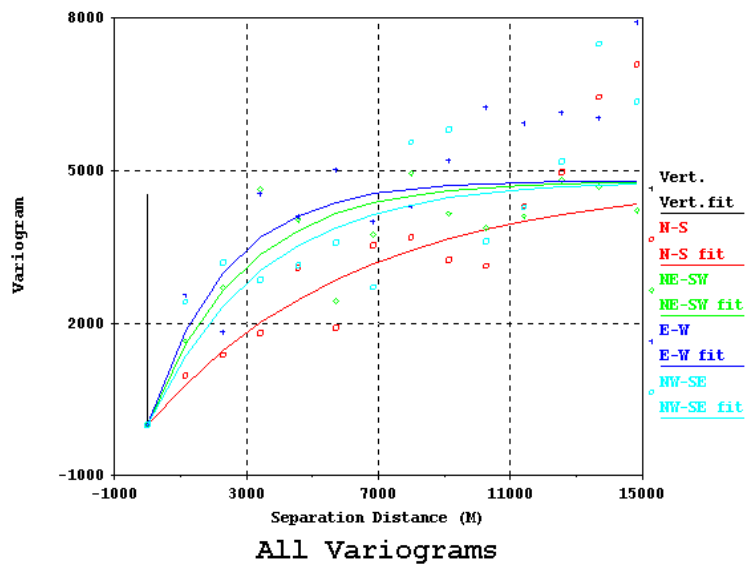


Figura 27. Curva de ajuste de los variogramas teóricos de Intensidad Magnética Total.

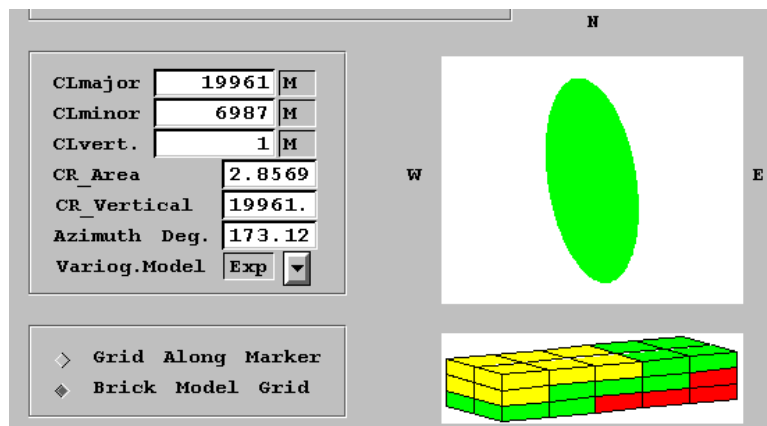


Figura 28. Representación de la Elipse de Anisotropía.

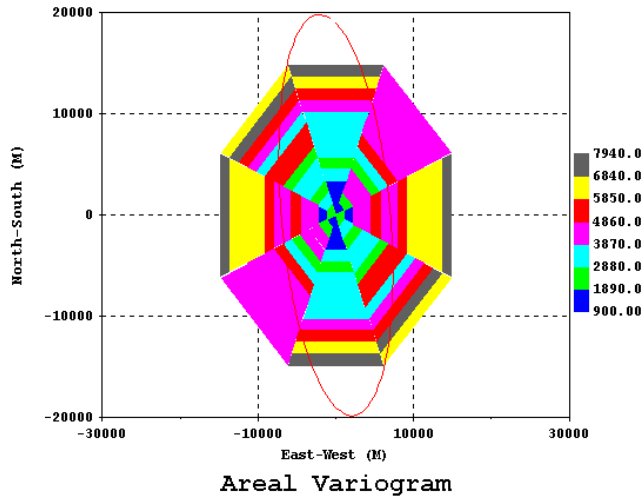


Figura 29. Roseta de distribución espacial de Intensidad Magnética Total.

Para los datos gravimétricos se obtuvo que el variograma de menor error fue el gaussiano (6.3094%); presentando éstos una anisotropía geométrica (figura 30). En cuanto a la elipse de anisotropía (figura 31) podemos decir que presenta una tendencia de mayor variación N-E y su menor variación N-W; la roseta de anisotropía (figura 32) confirma la dirección de tendencia. Los valores de eje mayor y menor de la elipse son 65898 y 23075 mgals respectivamente. La relación entre los radios es de 0.3501. El valor de azimut es 142.5° .

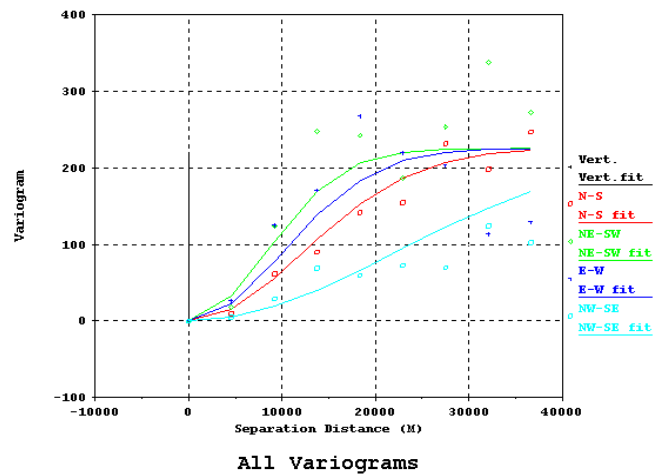


Figura 30. Curva de ajuste de los variogramas teóricos de las Anomalías de Bouguer.

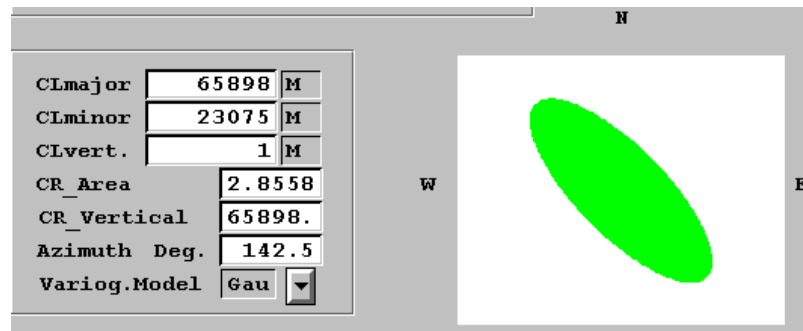


Figura 31. Elipse de Anisotropía de la Anomalía de Bouguer.

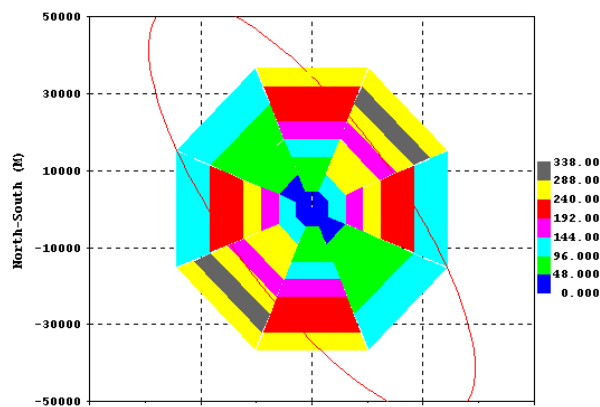


Figura 32. Roseta de distribución espacial de la Anomalía de Bouguer.

4.3- ANÁLISIS ESPECTRAL

El análisis espectral se realiza para una malla de datos en el dominio espacial, los cuales deben ser transformados al dominio de frecuencia mediante la aplicación de filtros en el dominio de Fourier, es decir, mediante este análisis se puede calcular el contenido de longitudes de onda de anomalías compuestas dentro de un área de estudio, permitiendo así que el intérprete pueda distinguir y reconocer las fuentes profundas de las superficiales.

Es importante destacar que el espectro de energía promediado radialmente, es una función del número de ondas y se calcula a partir del promedio de la energía en todas las direcciones para un mismo número de ondas, por tal razón, cuando se considera una malla de datos que es lo suficientemente grande como para incluir distintas fuentes, el logaritmo del espectro de dichos datos puede ser interpretado para determinar la profundidad estadística de los topes de las fuentes, usando la siguiente relación:

$$\text{Log } E(r) = 4\pi zr \quad (1)$$

La profundidad de un conjunto estadístico de fuente se determina por la expresión:

$$z = -s / 4\pi$$

Donde z es la profundidad y s es la pendiente del logaritmo del espectro.

Conociendo el mapa de Intensidad Magnética Total (figura 37), se procedió a determinar el análisis espectral de perfiles correspondientes al área de estudio, para estimar la profundidad a la que se encuentra la fuente anómala causante de la anomalía.

A continuación se indican las profundidades estimadas para los tres perfiles:

Para el perfil A las profundidades estimadas son las siguientes:

- a) Fuente profunda: 9,95 km
- b) Fuente intermedia: 3,98 km
- c) Fuente superficial: 1,33 km

La fuente profunda (~ 10 km) puede representar el contacto entre las provincias geológicas de Pastora e Imataca o su equivalente litológico lateral en términos de la

densidad y la susceptibilidad magnética, ya que hacia la parte norte del perfil se localiza el Complejo de Imataca a una profundidad aproximada a la mencionada anteriormente.

Las fuentes intermedia y superficial están representadas por el cinturón de rocas verdes; esta profundidad de anomalía puede estar referida al contacto entre el Complejo Supamo y El Callao.

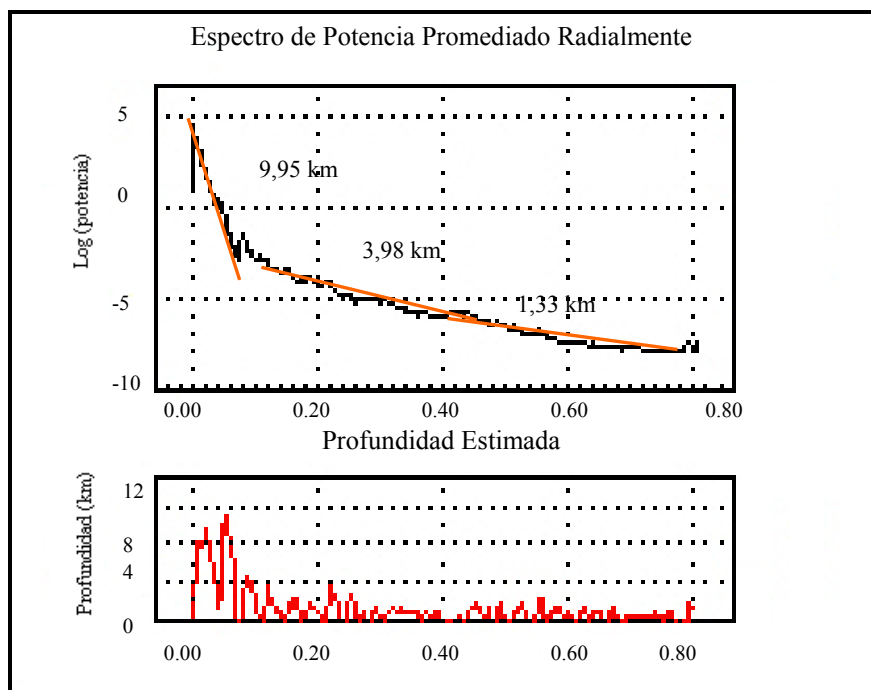


Figura 33. Análisis Espectral de Intensidad Magnética Total del Perfil A.

Para el perfil B las profundidades estimadas son las siguientes:

- a) Fuente profunda: 11,94 km
- b) Fuente intermedia: 6,36 km
- c) Fuente superficial: 1,59 km

Al igual que en el perfil anterior la fuente profunda (~ 12 km) puede estar representada por el contacto entre la base de Pastora y el tope de Imataca, mientras que la intermedia puede ser respuesta del contacto entre el CRV de Guasipati y el Complejo granítico de Supamo.

La fuente superficial esta asociada a los CRV que afloran hacia el noreste de la zona en estudio.

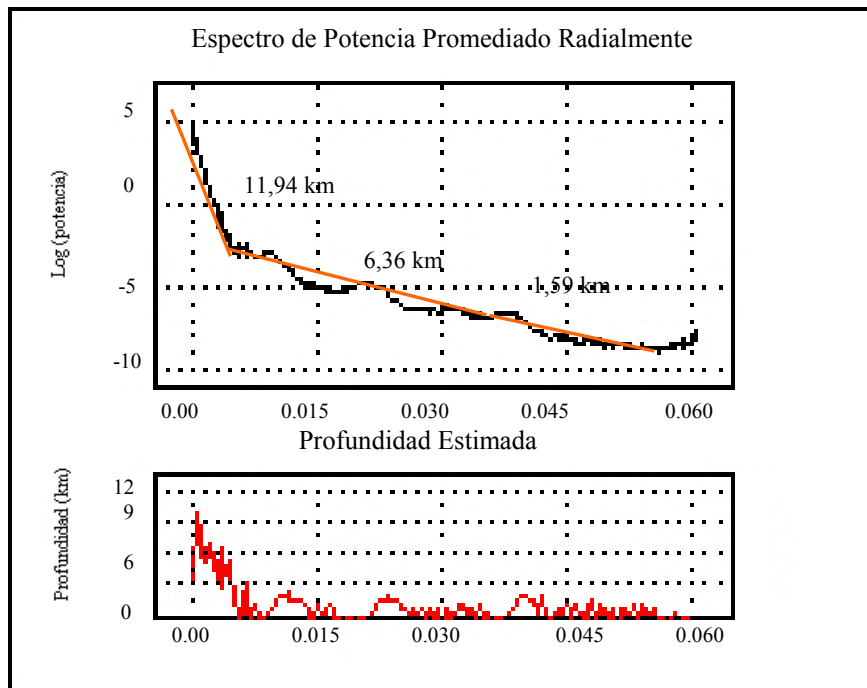


Figura 34. Análisis Espectral de Intensidad Magnética Total del Perfil B.

Para el perfil C las profundidades estimadas son las siguientes:

- a) Fuente profunda: 20,6 km
- b) Fuente intermedia: 7,95 km
- c) Fuente superficial: 3,97 km

La fuente profunda (~ 21 km) puede representar el contacto entre la corteza superior y la base del Complejo Imataca. Este perfil tiene la misma dirección de una línea sísmica interpretada por SCHMITZ ET. AL. (2.002) y los valores obtenidos con el análisis espectral coinciden con los que ellos propusieron en el modelo de corteza.

La fuente intermedia pueden estar relacionadas con la presencia de los CRV, que se encuentran en la parte central del perfil. Por último las profundidades más someras que pueden representar los afloramientos de hierro asociados a la Provincia de Imataca y que afloran hacia el oeste.

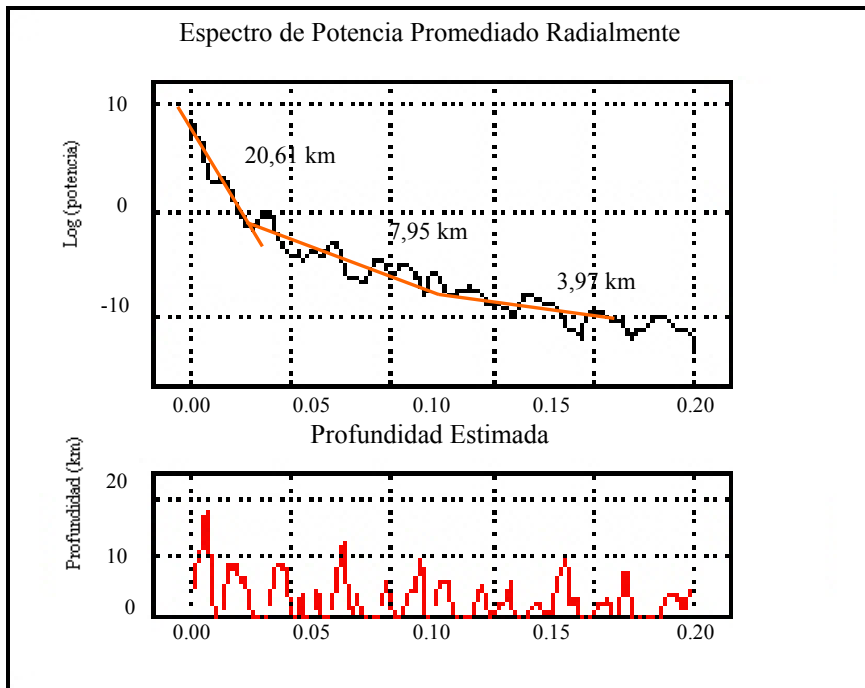


Figura 35. Análisis Espectral de Intensidad Magnética Total del Perfil C.

5.- MODELADO DE PERFILES CON INTERÉS GEOFÍSICO

Antes de realizar el modelado de perfiles, se determinaron los mapas de Intensidad Magnética Total y Anomalía de Bouguer del área de estudio. A continuación se presenta una interpretación cualitativa y cuantitativa de dicho mapas.

5.1- ANÁLISIS CUALITATIVO Y CUANTITATIVO DE LOS MAPAS MAGNÉTICOS Y GRAVIMÉTRICOS

5.1.1- MAPA DE INTENSIDAD MAGNÉTICA TOTAL

En la parte nor-central del mapa de Intensidad Magnética total se observa la presencia de anomalías con tendencia noreste, mientras que hacia el suroeste la tendencia es este-oeste. Hacia el noreste el gradiente de $53 \gamma/\text{km}$ representa la separación entre cuerpos graníticos (Complejo Supamo) y un contacto metamórfico (Cinturón de Rocas Verdes); en las zonas cercanas a la anomalía el gradiente tiende a disminuir ($8\gamma/\text{km}$) y al suroeste encontramos un gradiente de $6 \gamma/\text{km}$. Se observa un mínimo de 6300 gammas hacia el suroeste posiblemente asociado a los granitos del Complejo Supamo y un máximo hacia la zona nor-central del mapa de 6750 gammas (figura 37).

5.1.2- SEPARACIÓN REGIONAL RESIDUAL

La separación regional residual se realizó aplicando la técnica de análisis de tendencia por superficies polinómicas. Para determinar la superficie residual de mejor ajuste se aplicó el método de Bondad de Ajuste (R^2), resultando ser el polinomio de grado 3 la respuesta matemática que mejor se ajusta y modela geológicamente el área; con un $R^2 = 67,05 \%$.

En el mapa regional de Intensidad Magnética Total, se observa que hacia la parte noreste del mapa (figura 38) es posible encontrar un valor máximo de 6710 gammas con una dirección aproximada N45° E, y un mínimo de 6310 gammas hacia al suroeste del mapa con dirección E-W, dichas tendencias coinciden con los cierres más representativos del mapa de intensidad magnética total.

En el mapa residual de anomalía magnética se observa un máximo absoluto de 110 gammas en la zona nor-central (figura 39), hacia el oeste encontramos un mínimo de -10 gammas. En este mapa se mantienen muchos cierres de anomalías que están presentes en el mapa de intensidad magnética total, por tal razón se puede decir que los minerales responsables de tales respuestas están ubicados cercano a la superficie o aflorando. Hacia el este y el área nor-central del mapa existe un gradiente fuerte de 60 γ/km . En la parte sur del mapa los valores aumentan hasta 50 gammas y el gradiente es muy suave (4 γ/km).

5.1.3- MAPA DE ANOMALÍA DE BOUGUER

El mapa de Anomalía de Bouguer (figura 40) de la zona de estudio se realizó utilizando toda la base de datos de la Red Gravimétrica Nacional, pertenecientes al Estado Bolívar; éste presenta un rumbo aproximado N30°E. Las curvas de isoanomalía de Bouguer en el área de estudio, presenta un mínimo de -30 miligal cerca del poblado de Guasipati, como respuesta de la presencia de cuerpos graníticos del Complejo Supamo. Existe un máximo gravimétrico representativo de -16 mgal en la región de El Callao, consecuencia de los cinturones de rocas verdes pertenecientes al Supergrupo Pastora.

Hacia el oeste y suroeste del mapa es posible observar un gradiente muy suave de $1 \gamma/\text{km}$, mientras que en la zona este y nor-central encontramos un gradiente fuerte de $2 \gamma/\text{km}$; existe un cambio de gradiente notable entre las curvas de isoanomalías de -40 mgals y las de -50 mgals , que representan la zona de contacto entre los cuerpos graníticos del Complejo Supamo y el cinturón de rocas verdes del Supergrupo Pastora.

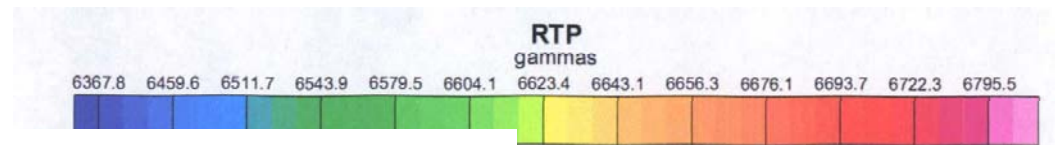
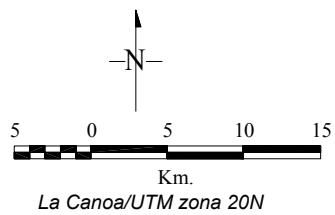
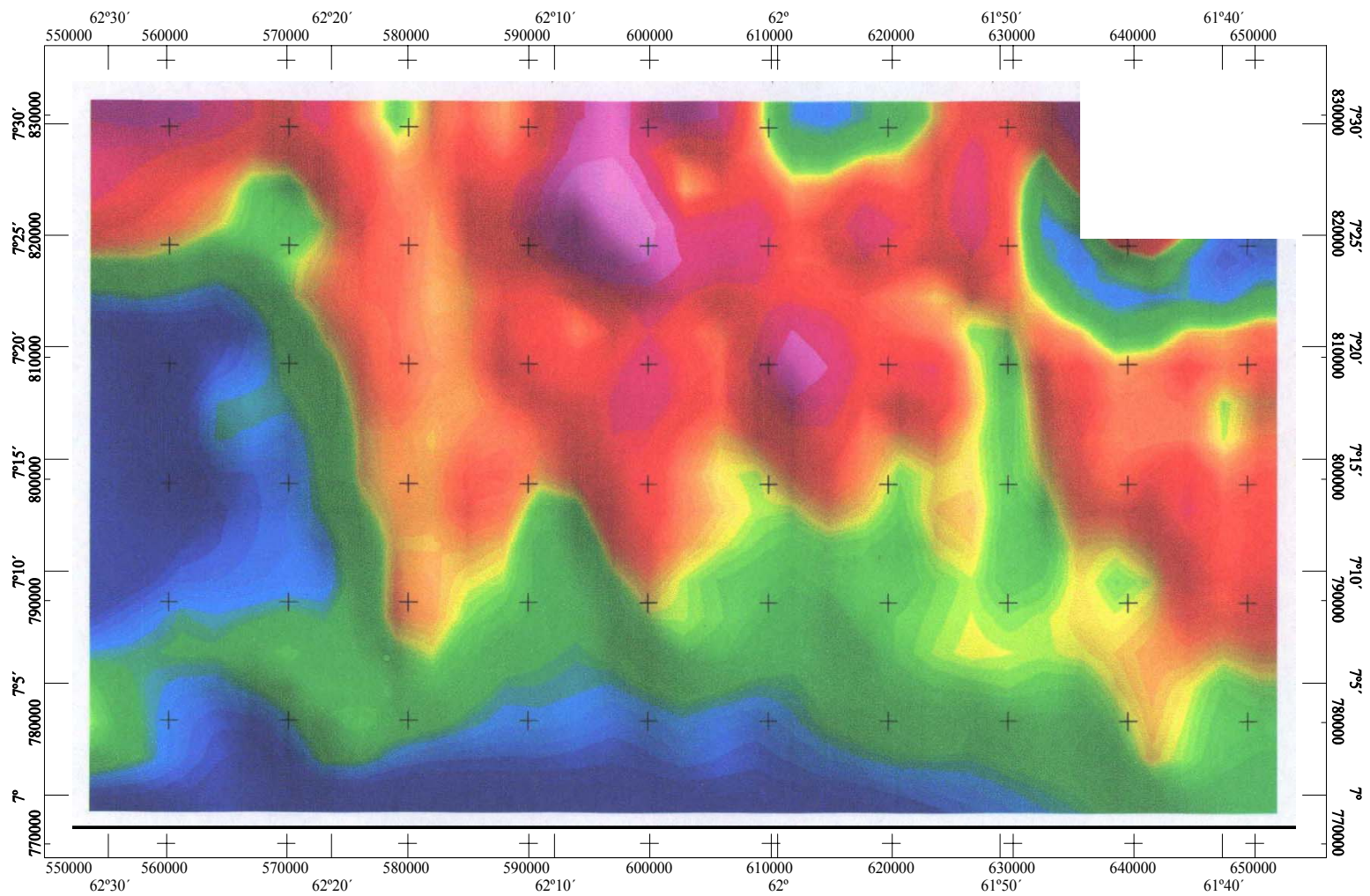
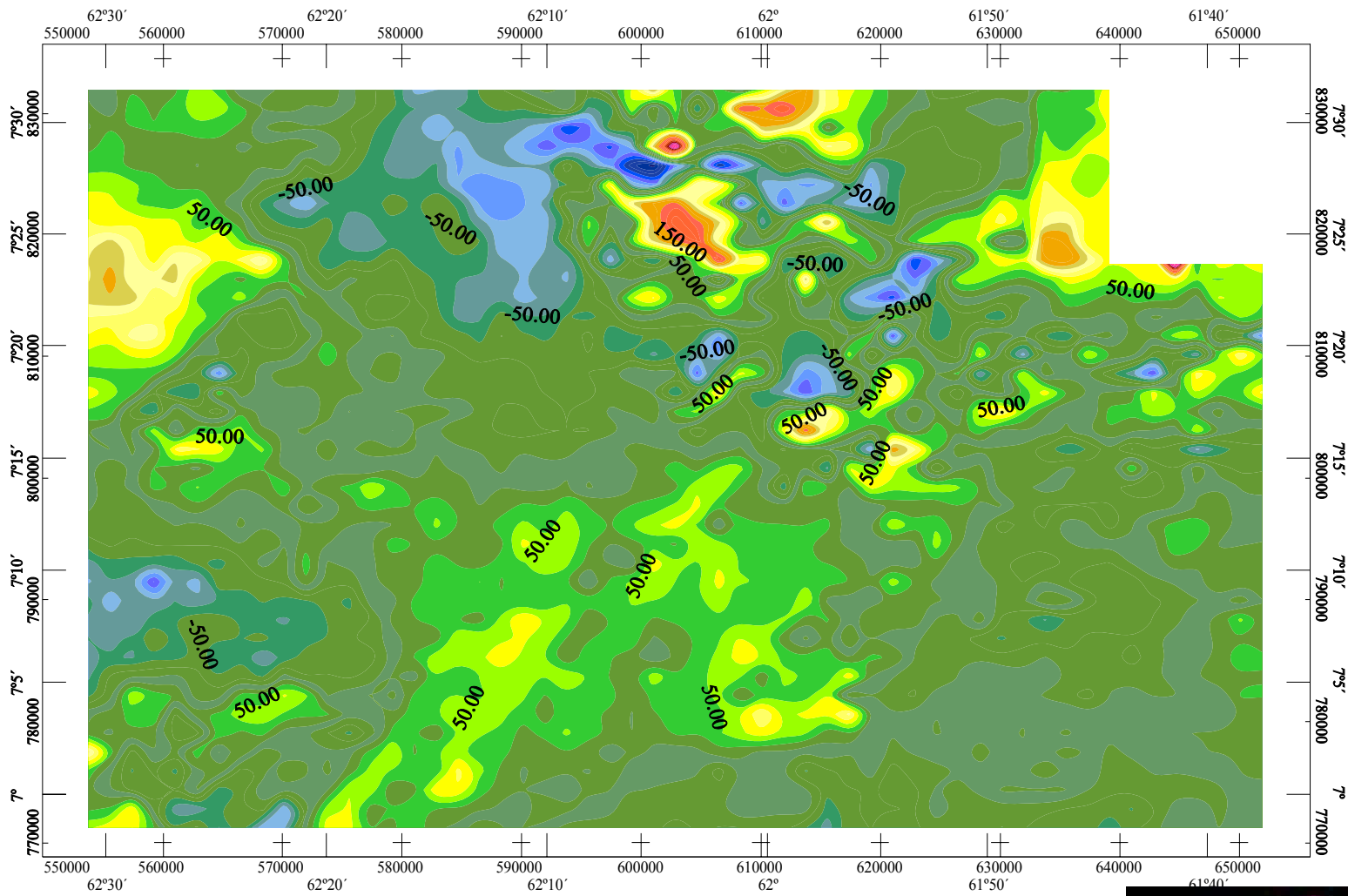


Figura 36. Mapa de Reducción al Polo de la zona de estudio ra 31. Mapa de Reducción al Polo de la zona de estudio



Mapa Residual de Intensidad Magnética Total (gamma)

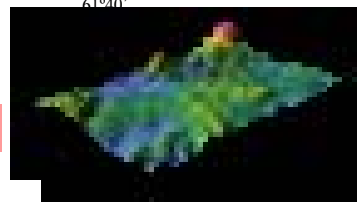
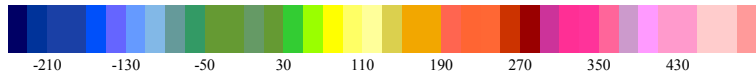
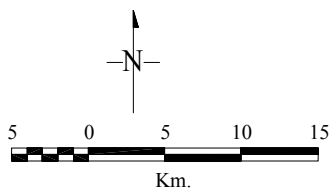
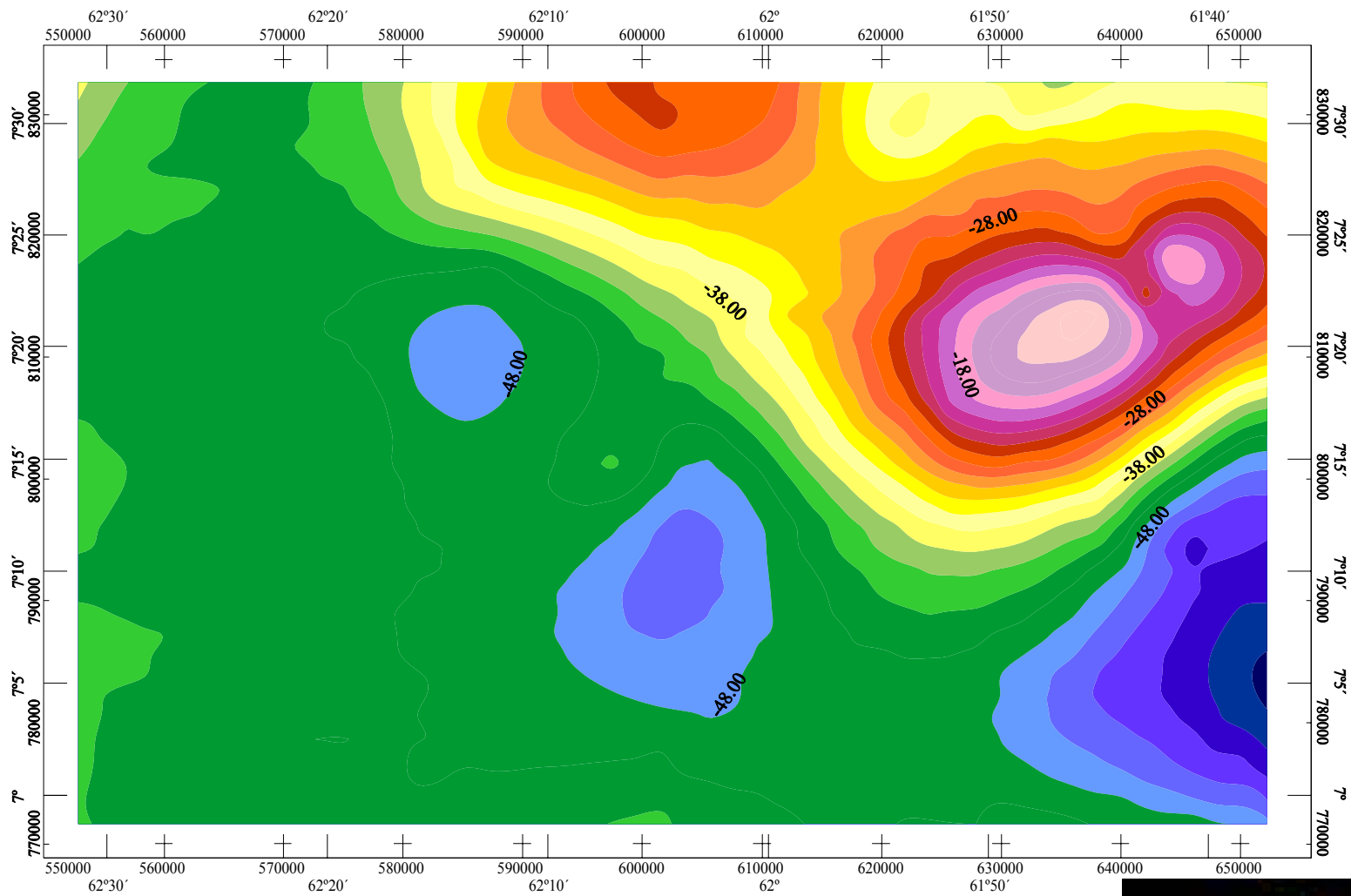
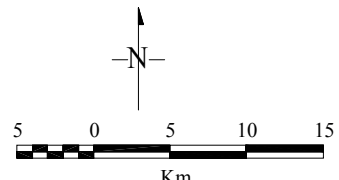
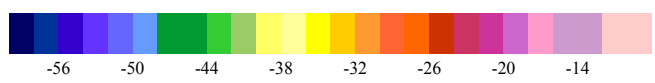


Figura 36 Mapa Residual de Intensidad Magnética Total de la zona de estudio



Mapa de Anomalia de Bouguer (mgal)



La Canoa/UTM zona 20N

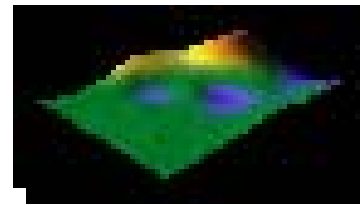


Figura 38. Mapa de Anomalia de Bouguer de la zona de estudio.

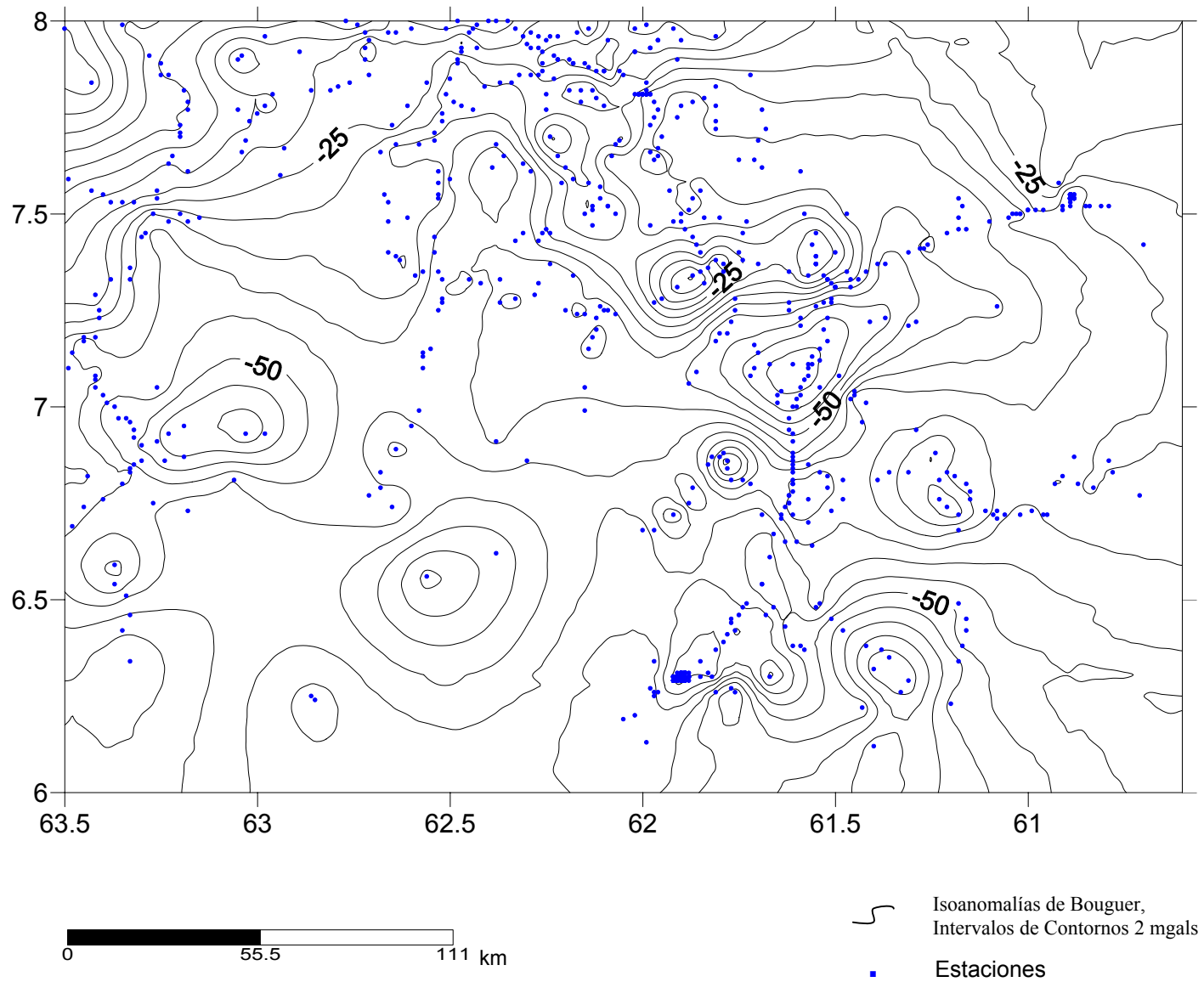


Figura 41. Mapa de Anomalía de Bouguer del área que abarca el proyecto en conjunto INGEOMIN – UCV.

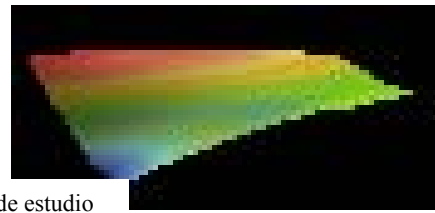
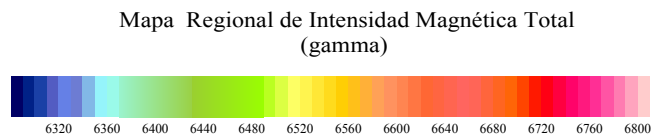
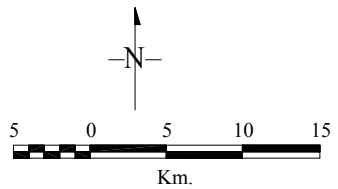
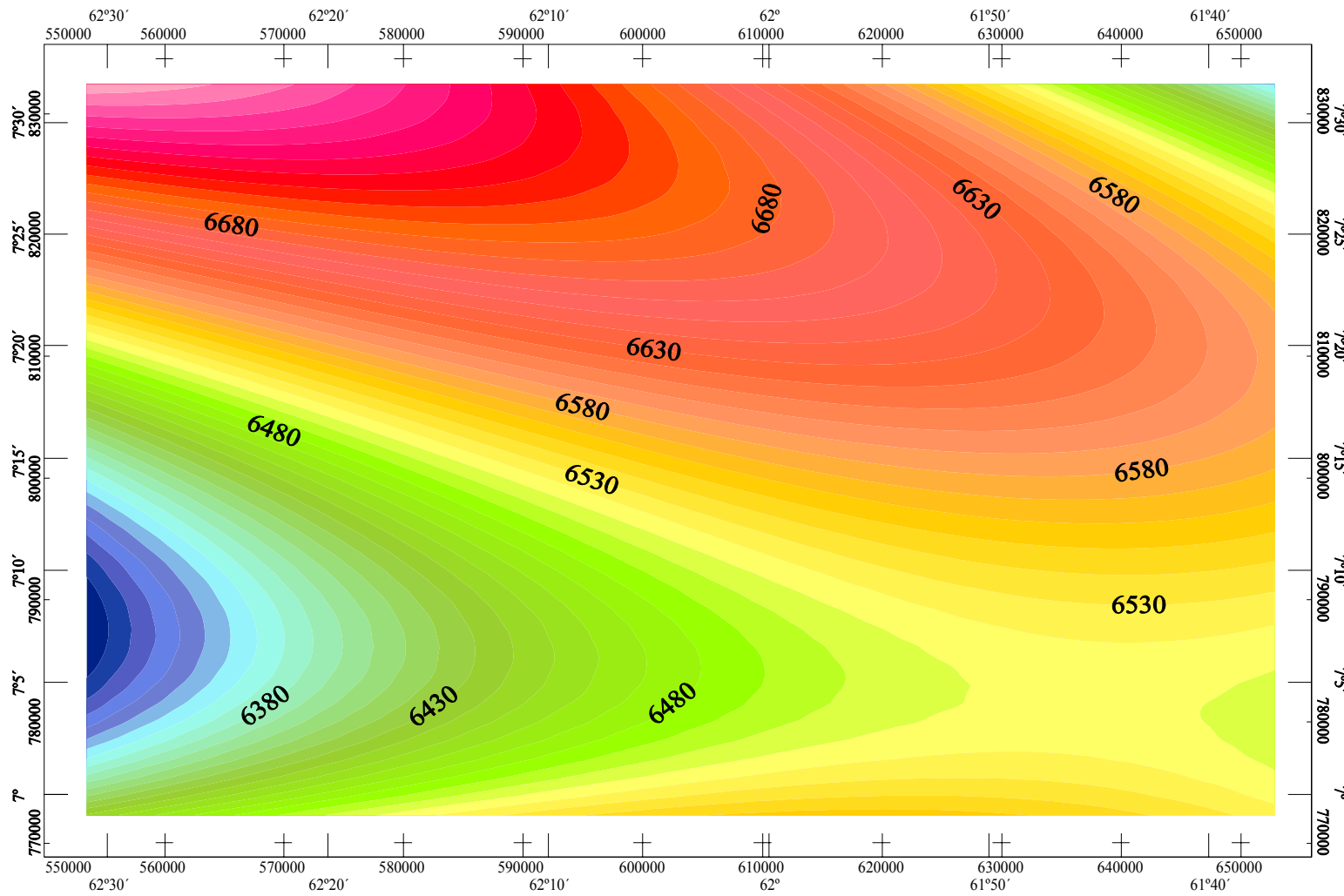


Figura 38. Mapa Regional de Intensidad Magnética Total de la zona de estudio
 Figura 37. Mapa Regional de la zona de estudio

5.2- RESTRICCIONES PARA EL MODELAJE MAGNÉTICO

Para la realización de los modelos magnético, se contó con información geológica obtenida a través de consultas bibliográficas realizadas y previamente mencionadas; reforzadas por el mapa Geológico Estructural de Venezuela (1.976) (figura 10) y la Columna Estratigráfica (figura 8).

Para controlar las profundidades de capas en los modelos geológicos, se dispuso de la interpretación de una línea sísmica con dirección E–W (SCHMITZ ET AL., 2.000) y de resultados obtenidos, mediante el análisis espectral de los datos (figura 33).

Para el control de la densidad y susceptibilidad magnética se dispuso de datos experimentales medidos en muestras de rocas tomadas en campo.

A partir de un mapa de Anomalía de Bouguer, y tomando en consideración la base de datos gravimétrico – magnético se interpretó el modelo del subsuelo que mejor se ajusta a los datos observados. En la figura 41 se observa el mapa de Anomalía de Bouguer obtenido con los datos de la Red Gravimétrica Nacional, pertenecientes al Edo. Bolívar y que abarca el área total del proyecto en conjunto INGEOMIN – UCV, cuya extensión es de aproximadamente 73.926 km².

5.3- PERFILES PARA EL MODELAJE GRAVIMÉTRICO – MAGNÉTICO DEL SUBSUELO

En el área de estudio se escogieron tres perfiles (A, B y C), considerando las restricciones para el modelaje magnético mencionadas anteriormente, cuyas características se describen a continuación:

Perfil A: Se encuentra situado en la longitud $62^{\circ} 15' W$ y entre latitudes $7^{\circ} 00' N$ y $7^{\circ} 30' N$, con dirección N-S y tiene una extensión de 60 km (figura 42). Este perfil fue escogido debido a la variación de máximos y mínimos presentes en el mapa de intensidad magnética total.

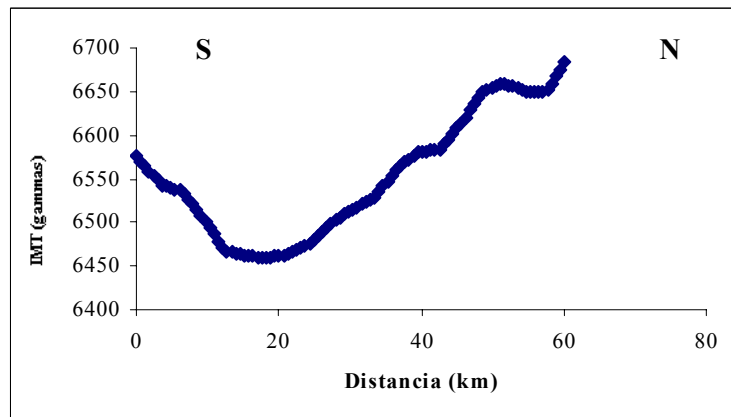


Figura 42. Intensidad Magnética Total del Perfil A.

Perfil B: Tiene una dirección N-S y está situado en la longitud $61^{\circ} 54' W$ y entre latitudes $7^{\circ} 00' N$ y $7^{\circ} 30' N$, abarca una extensión de 63 km (figura 43). Este perfil pasa sobre el poblado de Guasipati y atraviesa el contacto entre el cinturón de rocas verdes y los granitos del Complejo Supamo.

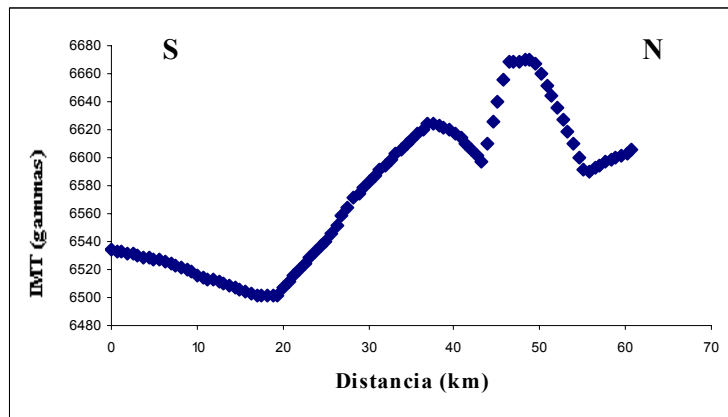


Figura 43. Intensidad Magnética Total del Perfil B.

Perfil C: Tiene dirección E-W y está situado en la latitud $7^{\circ} 21' N$ y entre longitudes $61^{\circ} 00' W$ y $63^{\circ} 00' W$, con una extensión de 166 km (figura 44). Este perfil está justo en la dirección de la línea sísmica interpretada por SCHMITZ ET AL. (2.000), y que de oeste a este desde Ciudad Piar hasta Bochinché, atravesando los poblados de El Manteco, El Callao y Tumeremo.

Para la realización de este perfil se consideró un área mayor a la estudiada, debido a que existe continuidad con las zonas aledañas y se tiene control de la línea sísmica mencionada anteriormente.

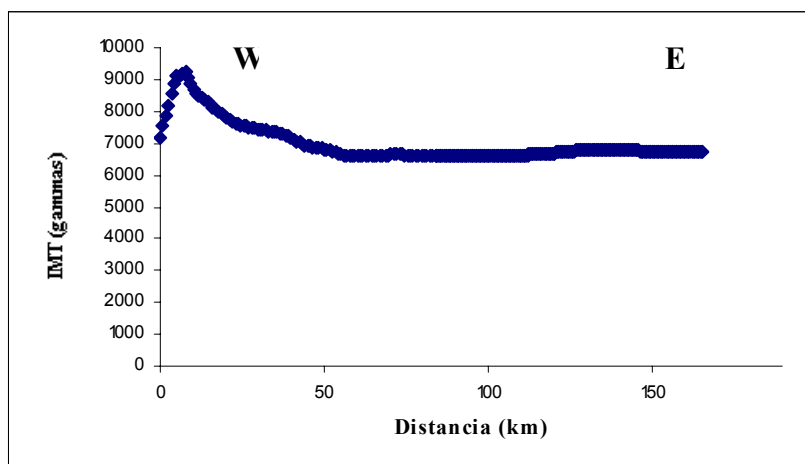

















Figura 44. Intensidad Magnética Total del Perfil C.

5.4- MODELADO DE PERFILES A, B Y C.

Para el modelaje de los perfiles se partió de la información geológica del área, y el análisis espectral de los perfiles, con los cuales se controló la profundidad de las unidades litológicas y fuentes anómalas presentes.

A continuación se dan a conocer las características de las unidades presentes en los modelos propuestos (tabla 17):

Tabla 17. Característica de los cuerpos presentes en el modelo propuesto

<i>Litología</i>	<i>Densidad (g/cm³)</i>	<i>Susceptibilidad (c.g.s)</i>	<i>Escala de Colores</i>
Formación el Callao	3	0,004	
Formación Yuruari	2,6	0,0003	
Formación Caballape	2,45	0,0001	
Complejo Suparno	2,65	0,02	
Provincia de Imataca	2,9	0,011	
Complejo Suparno Removilizado	2,7	0,03	
Intrusión de Roca Básica	2,95	0,0056	
Granito de Parguaza	2,8	0,0028	
Manto Superior	3,1	0,012	
Formación Carichapo	2,64	0.0004	
Formación Carapo	2,66	0.001	
Formación Manamundo	2,64	0.001	
Formación Aza	2,6	0.00002	
Grupo Caroni	2,63	0,00002	
Formación Caruto	2,65	0,00004	

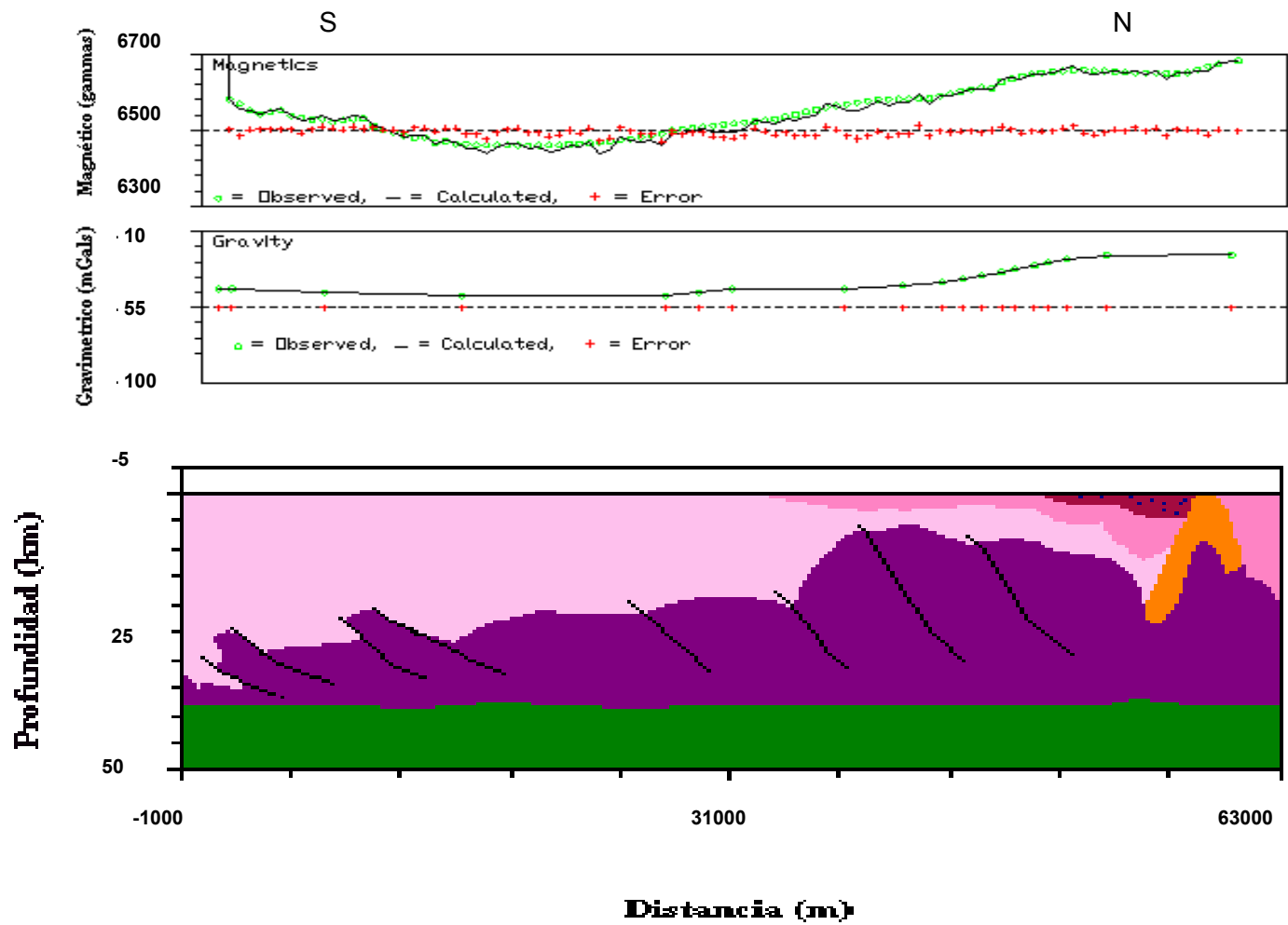


Figura 45. Modelo propuesto para el perfil A (Valores de densidad y susceptibilidad magnética en la tabla 17).

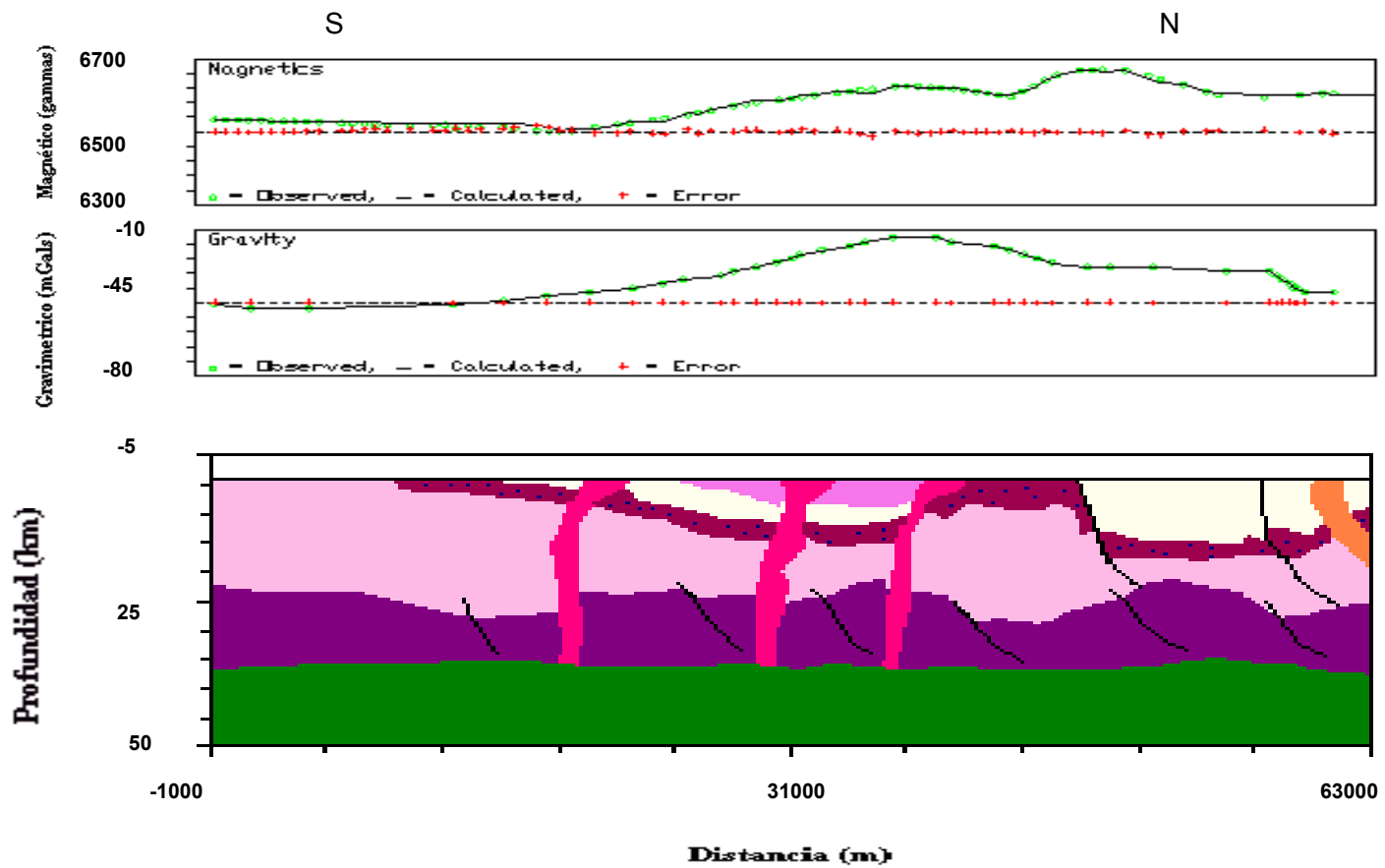


Figura 46. Modelo propuesto para el Perfil B (Valores de densidad y susceptibilidad magnética en la tabla 17).

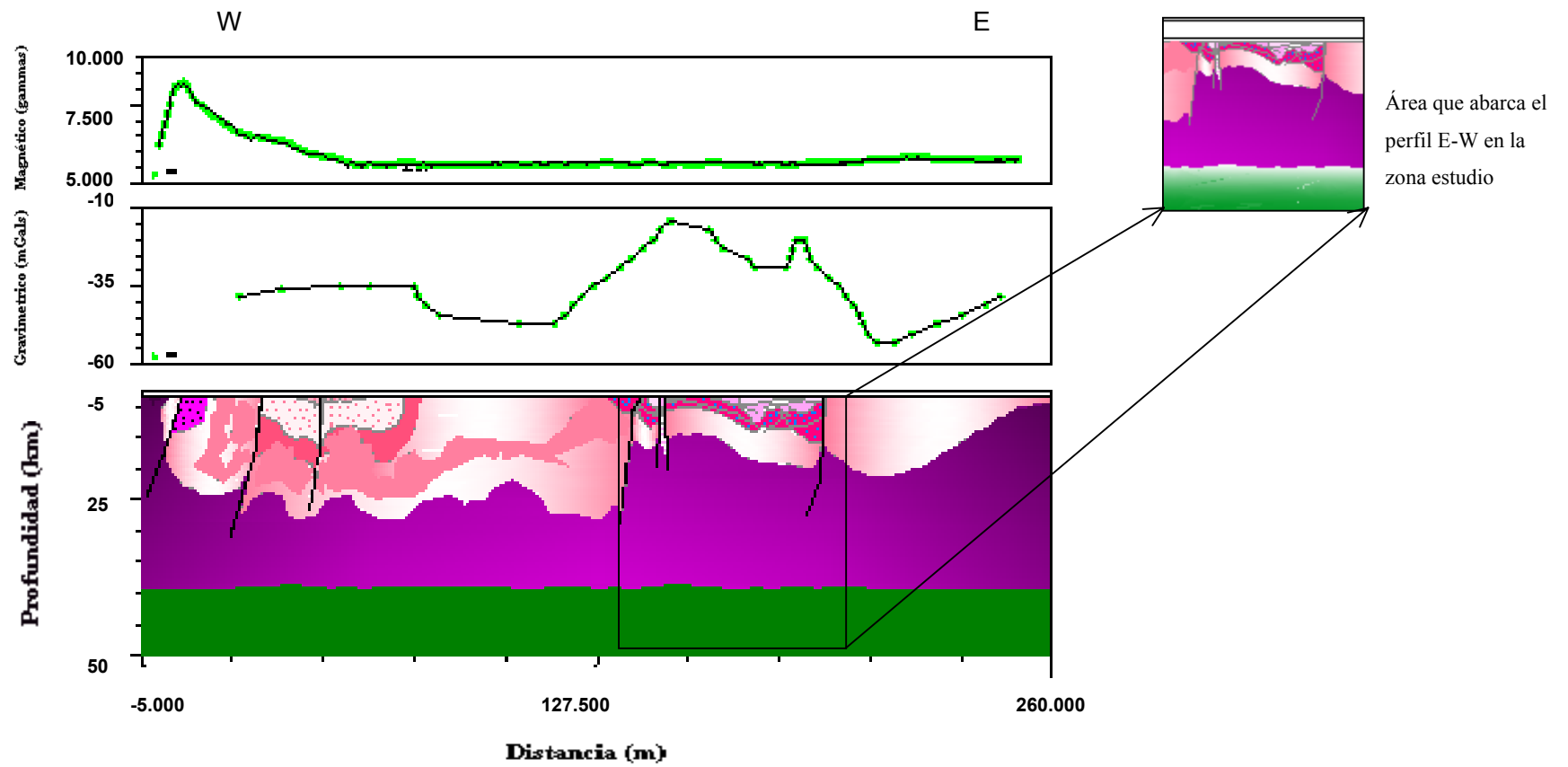


Figura 47. Modelo propuesto para el Perfil C, extendido que contiene datos de 63° 0' 0" al W y 61° 0' 0" al E.

5.4.1- ANÁLISIS DE LOS MODELOS

En el perfil A que cubre un área de 60 km y tiene una dirección N-S (figura 45), se observa la profundidad del manto superior (infra corteza) a 37 km.

Para el ajuste de curvas del modelo gravimétrico se utilizaron densidades en un rango de 2,45 a 3,1 gm/cm³, obteniéndose un error de 0,06 mgals, mientras que para los datos de Intensidad Magnética Total el error alcanzado fue de 9,94 γ con variaciones de susceptibilidad entre 0,0001 y 0,012 unidades de cgs.

En el modelo geológico que ajusta las curvas gravimétrica y magnética (figura 45), se observa el tope de la Provincia de Imataca o su equivalente a una profundidad de 8 km hacia el norte y aproximadamente 20 km al sur. La Provincia de Pastora está representada por el Complejo Supamo que aflora hacia el sur. Hacia el norte encontramos el Cinturón de Rocas Verdes, con una forma particular (algo plegado), debido a que ha sido afectado por un evento tectónico termal compresivo que generó un sinclinorio; éste incluye las formaciones de El Callao y el Complejo Supamo removilizado que alcanza una profundidad de 10 km hacia el norte. También advertimos la presencia de una intrusión del granito Parguazense que se extiende en profundidad hasta aproximadamente 20 km.

El máximo gravimétrico (-20 mgals) que se observa hacia el norte del perfil se le puede atribuir a la cercanía de la Provincia de Imataca, aún cuando la intrusión del granito de Parguazense y la Formación El Callao tienen densidades de aproximadamente 2.9 gm/cm³ y se encuentra aflorando. En esa misma dirección encontramos una respuesta magnética de aproximadamente 6650 gammas, la cual permite inferir que el causante de la anomalía es la cercanía de la Provincia de Imataca a la superficie.

En el perfil B con dirección N-S y extensión de 63 km, el modelo geológico (figura 46) que mejor ajusta las curvas gravimétrica y magnética presenta tres intrusiones de roca básica provenientes del manto superior. Hacia el sur encontramos al Complejo Supamo aflorando; en gran parte del área que abarca este perfil, aflora el Cinturón de Rocas Verdes de Guasipati, representado por las formaciones El Callao, Yuruari y Caballape. Hacia el norte se advierten dos fallas normales que alcanzan profundidades entre 20 y 25 km. El máximo gravimétrico (-10 mgals) y el máximo magnético (6680 gammas), representan al igual que en el perfil anterior la cercanía de la Provincia de Imataca, la cual se extiende en profundidad hasta unos 15 km.

En el modelo geológico de los perfiles A y B, se interpretaron pequeños corrimientos en lo que representa a la Provincia de Imataca.

En el perfil C con dirección E-W, se ha modelado el tope de Imataca a una profundidad aproximada de 10 km; la Provincia de Pastora conformada por el Complejo Supamo cuyo tope alcanza una profundidad de 6 km y el Cinturón de Rocas Verde que se encuentra aflorando. El área está limitada por dos fallas normales.

Mediante este estudio fue posible desarrollar un perfil con dirección E-W (figura 47) en común con los realizados por los Brs. Natalia Adrian y Engelberth Vargas, en el cual se puede observar que la respuesta del modelo de Intensidad Magnética Total alcanza valores de 9.000 γ y esto se debe a la presencia de cuarcitas ferruginosas pertenecientes a la Provincia de Imataca. La curva gravimétrica se podría decir que en su totalidad presenta un comportamiento dominado por el tope de la Provincia de Imataca.

5.5.- EVALUACIÓN DE RIESGOS EXPLORATORIOS

En la actualidad sólo existe en el área de estudio la explotación y exploración aurífera en veta y aluvional en zonas de fallas o de contactos pertenecientes a los Cinturones de Rocas Verdes, pero de acuerdo a que en otros países del mundo estos presentan una mineralización en elementos de titanio, cromo, cobre y tungsteno, es recomendable que se realice un estudio geológico – geoquímico a detalle que permita corroborar la presencia de dichos minerales y puedan ser considerados para la explotación. Por otra parte existe la posibilidad de que estos cinturones puedan contener depósitos de hierro.

Con las respuestas generadas por el CRV en el mapa de Intensidad Magnética Total de la zona estudiada, se podría inferir acerca de la presencia de los minerales antes mencionados, ya que los valores de IMT varían entre 6600 y 6800 gammas.

En el mapa regional de Intensidad Magnética Total (figura 38), se observa en la parte centro – norte una respuesta de 150 γ , la cual puede indicar presencia de una posible ocurrencia aurífera.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio arribamos a las siguientes conclusiones:

1.- La validación de los datos estadísticos de Intensidad Magnética Total indica que la población es unimodal y puede aproximarse mediante una distribución normal, mientras que en los datos gravimétricos, existen más de dos poblaciones. El análisis geoestadístico para los datos magnéticos arroja que el variograma teórico con menor error de ajuste es el exponencial y la dirección de la elipse de anisotropía corrobora la dirección de la anomalía presente en el mapa de Intensidad Magnética Total. Para los datos gravimétricos el variograma que mejor se ajusta es el gaussiano y la elipse de anisotropía sigue la dirección de la anomalía en el mapa de Anomalía de Bouguer.

2.- En el mapa de Intensidad Magnética Total se interpreta el contacto entre las intrusiones graníticas del Complejo Supamo y el Cinturón de Rocas Verdes de Guasipati, con tendencia noreste, mientras al sureste la tendencia es este - oeste. El gradiente hacia el noreste es de $53 \gamma/ \text{km}$; en las zonas cercanas a la anomalía el gradiente tiende a disminuir ($8 \gamma/ \text{km}$). Al suroeste del mapa se encuentra un mínimo de 6300 gammas y un máximo de 6750 gammas en la zona nor – central del mapa. El mapa regional de anomalía magnética tienen una orientación preferencial al noreste $N45^{\circ}W$; hacia el suroeste se observa un mínimo de 6310 gammas y un máximo al noreste de 6710 gammas. El máximo en el mapa residual de anomalía magnética es de 150 gammas ubicado en la zona nor-central del mapa, el mínimo de -10 gammas se encuentra hacia el oeste. El gradiente hacia el área nor – central del mapa es de $60 \gamma/ \text{km}$, el cual disminuye hacia el sur a unos $4 \gamma/ \text{km}$.

3.- Con el análisis espectral se establece que las zonas anómalas más profundas representan el contacto entre las Provincias de Pastora e Imataca, o su equivalente

geológico lateral. La zona intermedia y superficial se asocia al Cinturón de Rocas Verdes de Guasipati, debido a que éste se hacen notable por su composición mineralógica y las zonas superficiales representan en algunos casos el afloramiento de formaciones que conforman el Cinturón de Rocas Verdes, y en otros formaciones asociadas a la Provincia de Imataca, cuyo contenido mineralógico está dominado por magnetita.

4.- En el modelado del perfil A, se observa el tope de la provincia de Imataca a una profundidad de 20 km hacia el sur y 8 km hacia el norte. El Cinturón de Rocas Verdes de Guasipati alcanza una profundidad de 10 km hacia el norte. En el modelado del perfil B, se encuentran tres intrusiones de rocas básicas provenientes del manto superior. El Complejo Supamo aflora hacia el sur. Hacia el norte hay presencia de dos fallas que alcanzan una profundidad entre 20 y 25 km. En los perfiles A y B, se interpretaron pequeños corrimientos sobre la Provincia de Imataca.

5.- En el modelado del perfil C, se observa el tope de la provincia de Imataca a una profundidad de 10 km, el tope del Complejo Supamo está a una profundidad de 6km y el Cinturón de Rocas Verdes de Guasipati, se encuentra aflorando. Se realizó un perfil con dirección E - W extendido, que incluye las zonas estudiadas por los Brs. Natalia Adrian y Engelbert Vargas; el máximo valor que alcanza la respuesta magnética se atribuye a la presencia de cuarcitas ferruginosas pertenecientes a la Provincia de Imataca, al Oeste.

6.- Se generó un mapa de Intensidad Magnética Total del área que abarca el proyecto en conjunto INGEOMIN – Ucv, el cual abarca una extensión de 73.926 km².

7.- Para corroborar lo obtenido en este proyecto en conjunto, se recomienda hacer un estudio geo-minero de detalle que permita delimitar nuevas zonas de prospección aurífera y se dé a conocer la ubicación de otros minerales de interés presentes en la zona.

BIBLIOGRAFÍAS Y REFERENCIAS CITADAS

- ANHAEUSSER, C. (1.982).** *Aegean Greenstone Terranes: Geologic Evolution and Metallogenesis*. Rev. Brasileira de Geociencias 12 (1-3): 1-6.
- ASCANIO, T., G. ASCANIO y V. LOPÉZ, (1.984).** *Contribución a la Geología del Grupo Roraima en el Sureste de Venezuela*. II Symposium Amazónico, April 8-12, 1.984, Manaus. Anais. DN.PM. : 149-162.
- BENAIM, N. (1.972).** *Geología de la Región de Botanamo, Edo. Bolívar*. Cong. Geol. Venezolano IV. Caracas Nov. 1969. Memoria, Bol. Geol., Publ. Especial 5, III: 1291-1314.
- BHATTACHARYYA, B. (1.966).** *Computer Modeling in Gravity and Magnetic Interpretation*. Geophysics, 43 (5): 912-929.
- BICKLE, M. (1.978).** *Heat Loss form de Earth: Constraint on Archean Tectonics from the Relationship Between Geothermal Gradients and then Rate of Plate Production*. Earth Plan. SCI LETT. 40: 301-305.
- BONINI, W. (1.984).** *Magnetics Provinces in Western Venezuela*. Geological Society of American. Memoria 162: 161-173.
- CAMPBELL, I. y JARVIS, G. (1.984).** *Mantle Convection and Early Crustal Evolution*. Precamb. Res. 26: 15-56.
- CASTILLO, J., A. PERARNAU y G. SARDI, (1.986).** *Paleomagnetismo de Rocas de la Provincia de Roraima y el Complejo de Supamo en la Zona de La Escalera, Estado Bolivar: Trabajo en Progreso*. Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas, 1986, Memoria II 573-580.
- CATALDI, A. (1.992).** *On the Reduction to the Pole Aplied to Aeromagnetic Data Acquired in the Bolivar State, Venezuela*. VI Congreso Venezolano de Geofísica. P 442-448.
- CHASE, R. L. (1965).** *El Complejo de Imataca, la Anfíbolita de Panamo y la Trondjemita de Guri: Rocas Precámbricas del Cuadrilátero de Las Adjuntas – Panamo, Estado Bolivar, Venezuela*. Bol. Geol., Caracas, 7 (13); 105 – 215.
- CONDIE, K. (1.981).** *Archean Greenstone Belt*. Elsevier. 434 p.

- C.V.G. – Tecmin (1.987).** *Proyecto Inventario de los Recursos naturales de la Región de Guayana.* Ciudad Bolívar. Informe Interno. 445p
- DOBRIN, M. y C. SANIT. (1.988).** *Introduction to Geophysical Prospecting.* 4th edition. Mc. Graw-Hill Book Co., 867 p.
- ERASMO, A. (2.002).** *Análisis geoestadístico y Espectral de Datos Aeromagnéticos de la zona Centro – Occidental del Estado Amazonas.* Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. Caracas. Inédito.
- ESPEJO, A. (1.972).** *Técnica para la Elaboración de Mapas Isopléticos. Aplicación a un Modelo Geológico.* Cong. Geol. Venez. IV, Caracas, Noviembre 1969, Memoria, Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. 5, IV: 2201-2211.
- GIBBS, A. (1.979).** *Field Report on the Central and Western Barima Belt.* Geological Survey of Guayana Unpublished Report 74 pp. + map.
- GONZÁLEZ DE JUANA, C., J. ITURRALDE y X. PICARD (1.980).** *Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas.* FONINVES, TOMO I Y II, 1031 p.
- Golden Software Inc. (1.997)** SURFER (WIN 32) v. 6.04, Surface Mapping System (Programa).
- GRATEROL, V., J. CASTILLO y J. FLORES, (1.988).** *Correlación entre Gravimetría Regional y Ocurrencias Auríferas en la Provincia Geológica de Pastora.* Congreso Venezolano de Geofísica. Caracas, 1986, Memoria III 259-268.
- GRIDSTATPRO Inc. (2.003).** GIDSTATPRO v. 00. 10. s, Geoestatistical Modeling. (Programa).
- GUERRERO, D. (1.997).** *Interpretación del Yacimiento Lagunillas Inferior VCL-052 y VLD-0192 Bloques III/ IV Mediante Técnicas Geoestadísticas.* Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Escuela de Petróleo. Caracas. Inédito.
- HAMMER, S. (1.939).** *Terrain Corrections for Gravimeter Stations.* Geophysics, 4: 184-194.
- HURLEY, P.M., ALMEIDA, F. F. M., MELCHER, G. C., CORDANI, U. G., RAND, J. R., KAWASHITA, K., VANDOROS, P., PINSON JR., W. H. y FAIRBAIRN, H. W (1.967).** *Test of Continental Drift by Comparison of Radiometric Ages.* Science, 157 (3788): 495 - 500.

_____, FAIRBAIRN, H. W., GAUDETTE, H. E., MENDOZA, V., MARTIN – BELLIZZIA, C., y ESPEJO, A., (1.973, 1.977). *Progress Report on Ages Dating in the Northern Guyana Shield*. Cong. Latinoamericano Geol. II, Caracas, Noviembre 1.973, Resumen (1973); Memoria (1.977): Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. 7, IV: 3035 – 3044.

Interpretación de los Levantamientos Aeromagnéticos en Algunas Zonas Ferríferas del Estado Bolívar. Aero Service Corporation Philadelphia 20, Pennsylvania. October 1.954.

ISASKS. E y M. SRIVASTABA, (1.989). *An Introduction to Applied Gestatistics*. Oxford University Press, Oxford, p 561.

KOROL, B. (1.965). *Estratigrafía de la Serie Pastora en la Región Guasipati – El Dorado*. Presentado en: Cong. Cent. Col. Ing. Venez., 1961; Publ. en: Bol. Geol., Caracas 7 (13): 3 - 17.

Léxico Estratigráfico de Venezuela. Segunda Edición (1.970). Venezuela. Boletín Geológico. Publicación Especial 4, 756 p.

LOGACHEV, A. y V. ZAJAROV (1.978). *Exploración Magnética*. Editorial Reverté S.A., 346 p.

LÓPEZ, C. (1.996) *Estudio Geológico de un área ubicada al noreste del Dorado, Estado Bolívar. Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geología. Caracas. Inédito.

MARTÍN, B., C. (1.974) *Paleotectónica del Escudo de Guayana*. Conf. Geol. Inter – Guayana IX, Ciudad Guayana, Venezuela, Mayo 1.972, Memoria, Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. 6: 251 – 305.

MARTIN, H. (1.986). *Effect of Steeper Archean Geotermel Gradient on Geochemistry of Subduction-zona Magmas*. *Geology* 14: 753-756.

MENDOZA, V. (1.973). *Evolución Tectónica del Escudo de Guayana (Resumen)*. Cong. Latinoamericano de Geología II, Caracas, Noviembre 1.973, Resúmenes: 75.

MEDOZA, V. (1.977). *Evolución Tectónica del Escudo de Guayana*. II Congreso Latinoamericano de Geología. Nov. 1.973. Memoria, Bol. Ggeol., Caracas. Publ. Especial 7, III: 2237-2270.

- _____. (1.980). *Petrotectonic Provinces of the Amazonas Territory, Guiana Shield, Venezuela*. 26 th International Geological Congress, Paris, July 7-17, 1.980. Resumes 26 v. 1, p. 99.
- MENÉNDEZ, V. de V., A. (1.968).** *Revisión de la Estratigrafía de la Provincia de Pastora según el estudio de la Región de Guasipati, Guayana Venezolana*. Bol. Geol., Caracas, 9 (19): 309 - 338.
- _____. (1.972). *Geología de la Región de Guasipati, Guayana Venezolana*. Cong. Geol. Venez. IV, Caracas, Noviembre 1.969, Memoria, Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. 5, IV: 2001 – 2046.
- Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Dirección de Geología. Dirección de Recursos Minerales .** Informe: Sobre algunas Anomalías Geofísicas en a Zona 3, Guasipati. Por **WIKENDER, T.** 30 de Abril 1.973.
- MORENO, L. y V. MENDOZA (1.975).** *Petroquímica de las Rocas Graníticas del Alto Supamo, Guayana Venezolana*. Conf. Geol. Inter-Guayanas X, Belen, Para, Brasil, Nov.1.975. Memoria 430:152.
- MORENO, L. y M. LIRA (1.977).** *Algunas Consideraciones Geoquímica sobre las Diabasas de la Guayana Venezolana*. Cong. Geol. Venez. V, Caracas, Noviembre 1.977, Memoria, A. Espejo et al., Editores, Min. Energía y Minas – Soc. Venez. Geol., II: 611 – 638.
- NETTLETON, L. (1.976).** *Gravity and Magnetics in Oil Prospecting*. Editorial Mc. Graw-Hill, 121 p.
- RINGWOOD, A. (1.974).** *The Petrological Evolution of Island Arc Systems*. J. Geol. Soc. London 130: 183-204.
- SCHITZ, M., J. CHALBAUD, J. CASTILLO y C. IZARRA (2.000).** *The Crustal Structure of the Guyana Shield, Venezuelan, from Seismic Refraction and Gravity Data*. Tectonophysics. 345: 105-118.
- SIDDER, G. and V. MENDOZA (1.991).** *Geology of the Venezuelan Guyana Shield and its Relation to the Entire Guyana Shield*. U.S. Geological Survey Open – File Report. 91-141.
- SIERRA, R. (2.002).** *Reprocesamiento y Reinterpretación de Datos Aeromagnéticos del Sur de Puerto Ayacucho. Estado Amazonas*. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. Caracas. Inédito.

- TELFORD, W., L.GELDART, R. SHERIFF, y D. KEYS (1.976).** *Applied Geophysis.* Cambridge University Press, 860 p.
- TOSIANI, T. (1.987).** *Recopilación de Métodos para la Discriminación de Diferentes Tipos de Basaltos y su Aplicación a los Cinturones de Rocas Verdes de la Guayana Venezolana.* Trabajo de Ascenso. UCV. Instituto de geoquímica. Inédito. 91 p.
- U.S. Geological Survey y Corporación Venezolana de Guayana, Técnica Minera, C.A.** *Geology and Mineral Resource Assessment of the Venezuelan Guayana Shield.* Bulletin 2062. United States Government printing office, Washington: 1.993. 121 p.
- VARGAS, C. (2.002).** *Estudio Aeromagnético de la Región Central de la Sierra de Perija. Estado Zulia.* Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Departamento de Geofísica. Caracas. Inédito.
- VISAUTA, B. (1997).** *Análisis Estadísticos con SPSS para Windows.* Estadística Básica. Mc Graw-Hill. Derechos Reservados.
- WINDLEY, B.F. (1.978).** *The Evolving Continents.* J. Wiley, 385 p.

APÉNDICES

1.- APÉNDICE A: NOCIONES BÁSICAS DE ESTADÍSTICA Y GEOESTADÍSTICA

Estadística

La estadística es la ciencia que trata sobre la toma, organización, recopilación, presentación y análisis de datos para deducir conclusiones sobre ellos y para tomar decisiones que estén de acuerdo con los análisis efectuados. En estadística se acostumbra estudiar una parte del total que recibe el nombre de muestra, mientras que la totalidad del conjunto se denomina población. A la hora de llevar a un estudio de interés algún parámetro o variable, es importante realizar un análisis estadístico.

Distribución de Frecuencia

La distribución de frecuencia es un elemento de estadística que se utiliza por ser una de las vías más simples para analizar un conjunto de muestras. En este análisis la muestra está dividida en varias clases, donde una clase es definida como un rango de valores y el número de medidas encerradas en una clase particular es llamada una clase de frecuencias. La representación gráfica de una frecuencia de distribución es llamada histograma de frecuencia y la fracción de los elementos que se encuentran en una clase particular es llamada frecuencia relativa (figura 48).

Existen varios tipos de medidas de centralización, las más frecuentes: la media aritmética o media, la mediana, la moda, la media geométrica, la media ponderada y la media armónica.

La Media o Esperanza

Se define como el promedio de las soluciones de un experimento aleatorio si el experimento se realiza un gran número de veces.

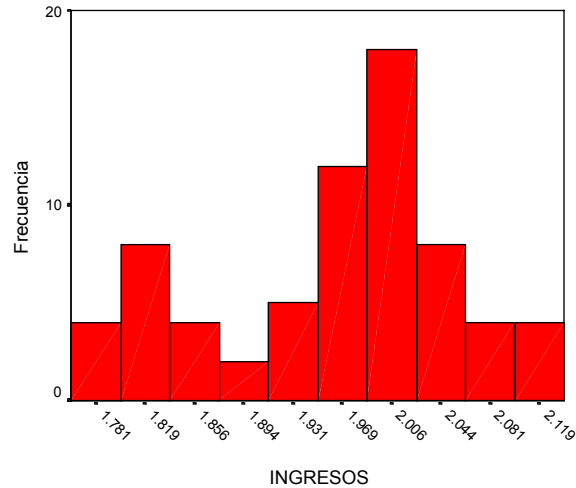


Figura 48. Modelo de un Histograma de frecuencia.

La Media o Esperanza

Se define como el promedio de las soluciones de un experimento aleatorio si el experimento se realiza un gran número de veces.

La Moda

La moda de una serie de números es aquel valor que se encuentra con mayor frecuencia, es decir es el valor más común. Se obtiene por simple inspección y no por cómputo.

La Mediana

Se define como el valor o valor potencial tal que el 50% de los datos de la muestra se encuentra por debajo de ella y el otro 50% restante se encuentra por encima de ella. Geométricamente, la mediana es el valor de la abscisa que corresponde a la vertical que divide un histograma en dos partes de igual área.

Cuando la distribución es simétrica, la media, la mediana y la moda son idénticas. En estas circunstancias se deberá emplear la media como el valor más representativo de la muestra. Sin embargo, cuando la distribución es visiblemente asimétrica, la media proporciona una estimación falsa de la tendencia central.

En los gráficos (figura 49) se muestra la posición relativa de la media, la mediana y la moda para curvas de frecuencias que están sesgadas a la derecha y a la izquierda.

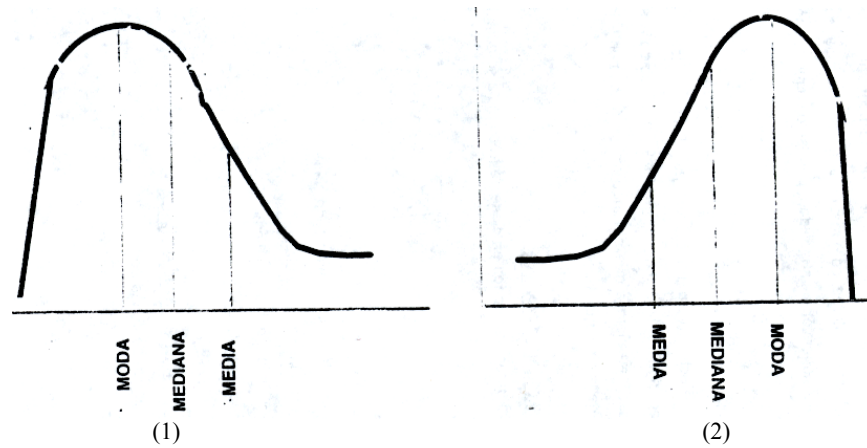


Figura 49. Representación de la media, mediana y moda en curvas sesgadas. (1) Curva sesgada a la derecha. (2) Curva sesgada a la izquierda.

Geoestadística

La geoestadística es una rama de la estadística dedicada al análisis de procesos distribuidos espacialmente, cuyo objetivo es la caracterización del fenómeno natural, lo cual conduce a dos tipos de aplicaciones. La primera es la estimación de valores a partir de un conjunto de medidas; y la segunda es la que permite obtener una medida de incertidumbre de la estimación. MATHERON (1.961), define la geoestadística como la aplicación del formalismo de las funciones aleatorias al reconocimiento y estimación de los fenómenos naturales.

Aplicación de los Variogramas en las Técnicas Geoestadísticas

El variograma es la herramienta principal de la geoestadística, la cual permite determinar la continuidad espacial de las variables regionalizadas y es una función monótona decreciente.

El variograma está definido matemáticamente mediante la ecuación:

$$\gamma(h) = \text{Var}\{Z(x) - Z(x+h)\}$$

Donde:

$\gamma(h)$ = Variograma.

Var= Varianza.

$Z(x)$ = Valor de variable regionalizada en el punto x .

$Z(x+h)$ = Valor de variable regionalizada en el punto $x+h$.

h = Distancia entre los puntos x y $x+h$.

Los variogramas se estiman a través de un variograma experimental, el cual debe ajustarse a un variograma teórico, que proviene de diferentes expresiones analíticas teóricas. La razón del empleo de variogramas teóricos se debe a que los variogramas experimentales pueden conducir a matrices singulares de soluciones múltiples o a errores de media cuadrática negativos en el sistema de ecuación Kriging (ISAACS y SRIVASTAVA, 1.989). Entre los variogramas teóricos comúnmente empleados encontramos:

Modelo Esférico. Es uno de los más empleados en la práctica. Se caracteriza porque alcanza la meseta (S) para una distancia finita ($h=a$) (figura 50). Este modelo es indicativo de fenómenos moderadamente continuos. La ecuación del modelo esférico es la siguiente:

$$\gamma(h) = \begin{cases} S \left[\frac{3|h|}{2a} - \frac{|h|^3}{2a^3} \right] & \text{si } |h| \leq a \\ S & \text{si } |h| > a \end{cases}$$

Donde:

S= Meseta o sill.

h= Distancia.

a= Rango.

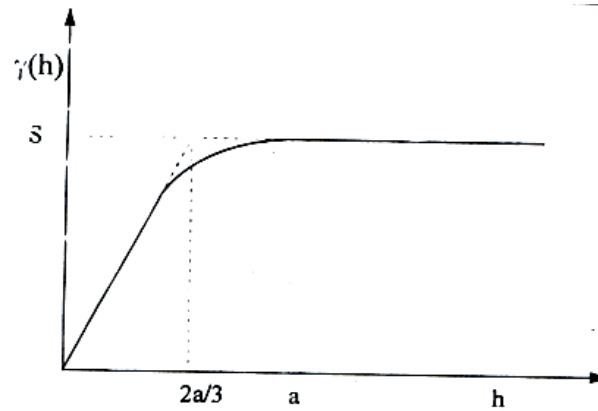


Figura 50. Modelo esférico.

Modelo Exponencial. El modelo exponencial se diferencia del modelo esférico porque alcanza su meseta en forma asintótica (figura 51.). La ecuación del modelo exponencial es:

$$\gamma(h) = S \left(1 - \exp \left[- \frac{|h|}{a} \right] \right)$$

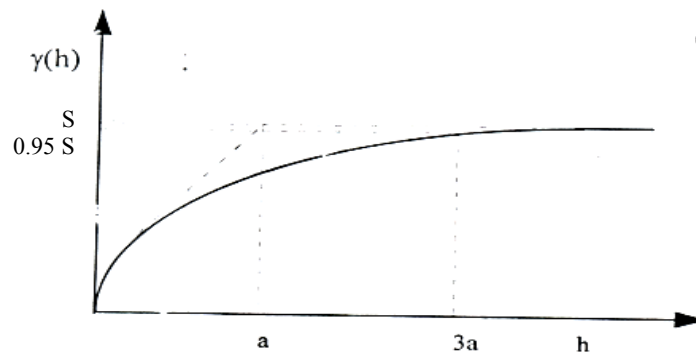


Figura 51. Modelo exponencial.

Modelo Gaussiano. El modelo gaussiano viene dado por la expresión:

$$\gamma(h) = S \left(1 - \exp \left[- \frac{|h|^2}{a^2} \right] \right)$$

Este tipo de modelo también alcanza su meseta en forma asintótica (figura 52). El comportamiento del modelo gaussiano cerca del origen es parabólico lo cual es indicativo de una gran regularidad.

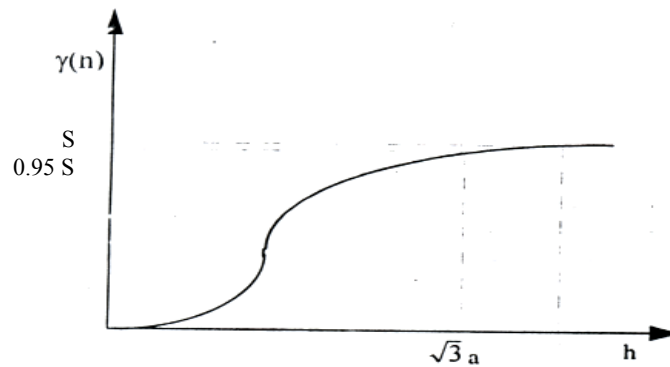


Figura 52. Modelo gaussiano.

Modelo Nuggett. Este modelo también es llamado efecto pepita, es indicativo de un fenómeno sin ninguna autocorrelación espacial. El modelo es cero a una distancia cero y aumenta al valor constante para cualquier distancia mayor que cero (figura 53). Su ecuación es la siguiente:

$$\gamma(h) = \begin{cases} 0 & \text{si } |h|=0 \\ C_0 & \text{si } |h|>0 \end{cases}$$

Donde:

C_0 = Efecto pepita.

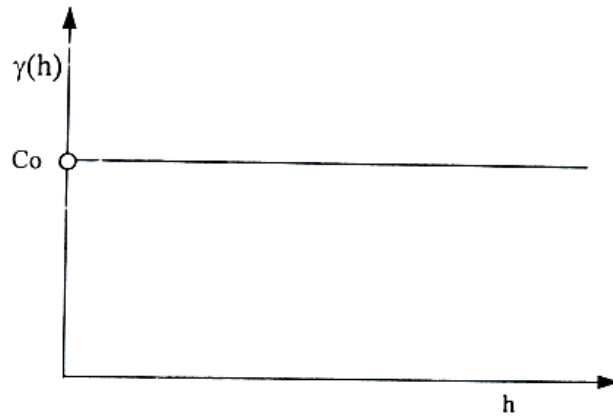


Figura 53. Modelo efecto de pepita puro

Los variogramas teóricos mencionados anteriormente son clasificados como modelos con meseta; se denominan así porque estos modelos exhiben un valor constante del variograma después de una cierta distancia. La distancia en que el variograma recibe un valor constante es llamado rango y el valor constante es llamado la meseta (figura 54). El valor de la meseta es típicamente cercano al valor de la varianza de los datos de muestras.

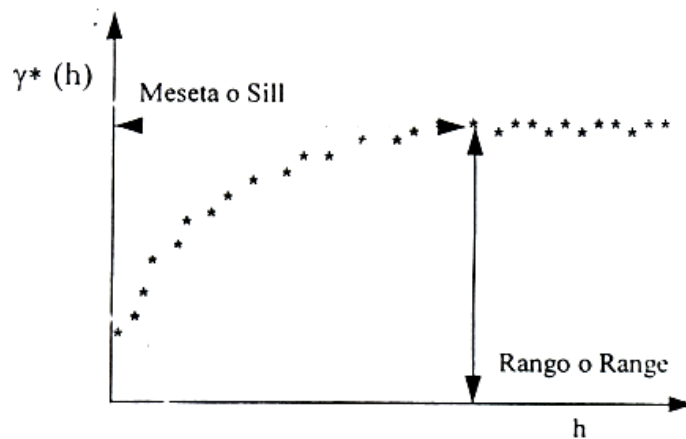


Figura 54. Modelo de variograma con meseta.

Cuando se tiene que en una dirección los valores están relacionados más fuertemente que en otra dirección existe una anisotropía en la relación espacial. Es en estos casos cuando se aplican los variogramas anisotrópicos. En el análisis de los datos de un yacimiento, típicamente se encuentran dos tipos de anisotropía, entre las cuales encontramos:

1. *Anisotropía geométrica*: Es observada en el caso donde el variograma en la dirección del eje mayor y menor tiene la misma meseta, pero diferentes rangos (figura 55).

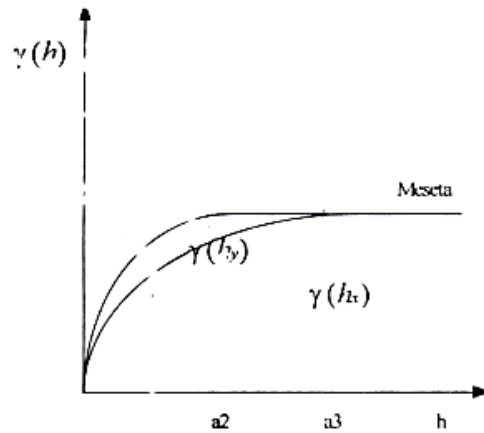


Figura 55. Modelo de anisotropía geométrica.

2. *Anisotropía Zonal*: Es el caso inverso a la anisotropía geométrica, es decir para diferentes direcciones tiene el mismo rango pero diferentes mesetas (figura 56).

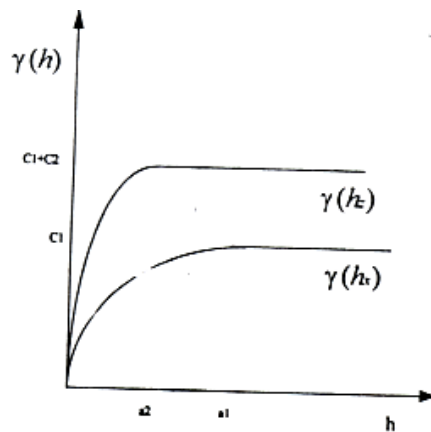


Figura 56. Modelo de anisotropía zonal.

Método Kriging

El método Kriging es uno de los métodos en el cual se apoya la geoestadística para realizar las distribuciones espaciales de las variables regionalizadas, tomando en cuenta su variabilidad espacial.

El desarrollo de las ecuaciones de Kriging ordinario se basa en lo siguiente:

1. *Estimación Lineal.* Permite obtener la estimación de valores desconocidos Z (X_0) en un punto (X_0), como una combinación lineal de valores medidos $Z(X_i)$ en los puntos de observación (X_i), así como la varianza del error de estimación.

$$Z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i \times Z_i$$

Donde:

Z^* = valor estimado de la variable regionalizada.

λ_i = Coeficiente de ponderación o de Kriging.

Z = Valores observados de la variable regionalizada.

2. *Estimación Insesgada o Sesgo nulo.*

$$E(Z^*) = E(Z), \text{ es decir: } \sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$$

3. *Varianza Mínima.*

$$\text{Var}(Z^* - Z) = E[(Z^* - Z)^2] \text{ sea mínima}$$

El Kriging ordinario es un interpolador exacto, por lo que sus ecuaciones no dependen de los valores medidos, sino solamente de sus posiciones y del variograma. Este método permite calcular estimados lineales de una variable regionalizada en un punto, sobre un área o dentro de un volumen. En el caso que el estimado sea sobre un punto se habla de Kriging puntual, y en el caso que el estimado sea sobre un área o un volumen se habla de Kriging por bloques.

A continuación una breve descripción de los tipos de Kriging mencionados anteriormente:

a. *Método de Kriging puntual.* Este es probablemente el método más simple en términos de computación, permite la estimación de un valor puntual en una localización donde no se tiene información.

b. *Método de Kriging por bloques.* Este se puede aplicar cuando se desean estimar los valores por bloques. Esta técnica se usa frecuentemente en la estimación de propiedades estáticas para las celdas de una malla, tales como porosidad y la saturación.

2.- APÉNDICE B: ANÁLISIS ESPECTRAL

MAGMAP de Geosoft (1.996), es un algoritmo matemático basado en la aplicación de filtros en el dominio de Fourier, con el fin de transformar una malla de datos en el dominio espacial al dominio del número de ondas. Este programa es comúnmente usado para resaltar la información de interés en un reducido grupo de datos 2-D.

Matemáticamente la transformada de Fourier en el dominio espacial $f(x,y)$ está definida por:

$$f(\mu, \nu) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(x,y) \cdot e^{-i(\mu x + \nu y)} d_x d_y$$

La inversa está dada por:

$$f(x,y) = \iint_{-\infty}^{\infty} f(\mu, \nu) \cdot e^{i(\mu x + \nu y)} d_\mu d_\nu$$

Donde μ y ν son números de ondas en las direcciones X y Y respectivamente, medidos en radianes por metro. Éstos están relacionados con “frecuencias” espaciales f_x y f_y expresadas en ciclos por metros.

Una malla de datos dada en el dominio espacial, puede ser cambiada a un dominio en el número de onda, mediante el uso de la Transformada Rápida de Fourier (FFT). El conjunto de datos en el dominio del número de ondas es llamada transformada, la cual está compuesta por números de ondas, expresadas en ciclos/metro y tiene una componente real y una imaginaria. Al aplicar la Transformada Rápida de Fourier, es importante tener en cuenta que una función en el dominio espacial tiene una única respuesta en el dominio del número de ondas y viceversa. También se debe tener presente que la suma de dos funciones en el dominio espacial es equivalente a la suma de su transformada.

El espectro de energía es una función 2-D de la energía relativa al número de ondas y dirección. El promedio del espectro es una función de número de onda y es calculado por el promedio de energía en todas las direcciones para el mismo número de ondas.

La transformada de Fourier de un campo potencial causado por un cuerpo prismático tiene una amplitud de espectro. La ubicación del punto máximo es una función que depende de la profundidad de las superficies del tope y la base, y cuyas amplitudes están definidas por sus densidades y magnetizaciones. El número de onda del punto máximo (w') se obtiene de la siguiente expresión:

$$w' = [\ln (z_b / z_t)] / (z_b - z_t)$$

Donde: w' , es el número de onda del punto máximo en radianes/metro.

z_t , es la profundidad del tope.

z_b , es la profundidad de la base.

El espectro de un prisma con tope y base es:

$$f(\mu, \nu) = e^{-z_t r} - e^{-z_b r}$$

$$r = \sqrt{(\mu^2 + \nu^2)}$$

(BHATCHARIA, 1.966)

Cuando se considera una malla de datos que es bastante grande e incluye muchas fuentes, el logaritmo del espectro de estos datos puede ser interpretado para determinar la profundidad estadística de los topes de las fuentes usando la siguiente relación:

$$\text{Log } E(r) = 4\pi z r$$

La profundidad de un conjunto estadístico de fuentes es determinada por la expresión:

$$z = -s/4\pi$$

Donde: z , es la profundidad.

s , es la pendiente del logaritmo del espectro.

Estas profundidades estimadas pueden ser utilizadas como una aproximación de las poblaciones de las fuentes magnéticas o gravimétricas.

3.- APÉNDICE C: ANÁLISIS APLICADOS A LAS MUESTRAS OBTENIDAS EN EL RECONOCIMIENTO DE CAMPO

Cálculo de Densidad

Para la determinación de la densidad de las muestras de rocas tomadas en campo, se contó con los siguientes equipos e instrumentos: una balanza semi analítica marca OHAUS modelo S200 con capacidad de 202 x 0.01g, un cilindro graduado, una bureta, un vidrio de reloj, embudo y papel filtro.

El procedimiento de laboratorio consistió en:

- Corte de las Muestras: Las muestras de rocas seleccionadas se cortan en un tamaño menor a 2 cm, de manera que entren en el cilindro graduado destinado a tal fin. Una vez cortadas y enumeradas, se procede a introducirlas en una estufa a 100 °C por un lapso de 10 horas, con el fin de secarlas, luego se colocan una a una sobre el vidrio de reloj para así obtener su peso; por separado se pesa el vidrio de reloj, para establecer una diferencia de peso y obtener el peso real de las muestras

- .

- Calibración del Cilindro Graduado: Se calibra el cilindro graduado con la bureta, realizando mediciones de volumen en el cilindro cada 1 ml (se realiza hasta los 25 ml), para obtener así una precisión de dos decimales. Con estas mediciones se genera la curva de calibración, de la cual se obtiene el factor de corrección para el cilindro, representado por la pendiente.

- Determinación del Volumen de las Muestras: El volumen de las muestras de rocas, se determina mediante la diferencia entre el volumen inicial de agua destilada en el cilindro y el volumen desplazado al sumergir la muestra. El valor obtenido de esta diferencia se multiplica por el factor de corrección para el cilindro.

Es importante señalar que para el caso de masas de muestras de rocas de alta porosidad se utilizó un embudo y papel filtro absorbente para no perder por disgregación parte de la muestra.

- Cálculo de Densidad: Conociendo el peso y el volumen de cada una de las muestras, se calcula la densidad para cada una de ellas.

Procedimiento para Determinar la Susceptibilidad Magnética

Para la determinación de susceptibilidad magnética de las muestras de rocas tomadas en campo, se siguió el siguiente procedimiento:

- Pulverización de las Muestras: Está se realizó utilizando un mortero para las muestras poco compactas y una prensa para las más compactas; una vez pulverizadas son depositadas en viales cilíndricos de vidrio modelo dram 5 debidamente identificados y pesados.

- Cálculo del Peso: Una vez conocido el peso de los viales por separado, se procede a depositar la muestra y pesarlos nuevamente para establecer la diferencia de peso y obtener el peso real de las mismas.

- Cálculo de la susceptibilidad: Se colocan los viales cilíndricos de vidrio en el susceptómetro (uno a uno), para obtener tres mediciones de voltajes, los cuales son promediadas con el fin de establecer un voltaje representativo de la muestra.

A continuación se presenta una breve descripción del uso del susceptómetro de rocas:

Uso del Susceptómetro de roca

Una vez encendido el equipo se debe verificar lo siguiente:

- Sensibilidad en 10 mV.
- Constante de tiempo 1 s.
- Señal de entrada A-B.
- Canal uno en X.
- Canal dos en Y.
- Fase cero grado.

Se utiliza una fuente de corriente alterna Oxford

- Frecuencia 1 KHz.
- Corriente en intervalo 4-4.8 mA.
- Offset en cero.

Luego se procede a:

- Balancear el puente (aproximar a cero el voltaje, parte real e imaginaria).
- Balancear el puente con cada canal del offset del look-in.
- Seleccionar modo Automático (Auto).
- Introducir la muestra en la bobina ubicada en la parte derecha.
- Medir la señal del canal uno.
- Sacar la muestra.
- Verificar que el puente vuelva al equilibrio.
- Realizar cinco repeticiones por muestra.
- Promediar las lecturas obtenidas.

Por último se calcula la susceptibilidad magnética empleando la expresión:

$$X = K \frac{\Delta E}{V E_0}$$

Donde:

X: susceptibilidad magnética por unidad de volumen en unidades del sistema cgs.

K: constante; $K= 3.5 \times 10^2 \text{ cm}^3$.

ΔE : Parte real del voltaje (eje X).

V: volumen de la muestra en cm^3 .

E_0 : Voltaje de alimentación de la fuente; $E_0= 10,26 \text{ V}$.