

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

Rigoberto Lázaro Prieto Cainzos

**"INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS
DE CUBA CENTRO-ORIENTAL:
CONTRIBUIÇÕES A CARTOGRAFIA E EXPLORAÇÃO MINERAL REGIONAL"**

Tese apresentada ao Instituto de Geociências como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Rigoberto L. P. Cainzos e aprovada pela Comissão Julgadora em 16/07/01.

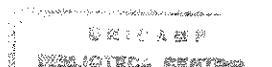
Orientadora: Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati
Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho
Prof. Dr. Gilberto Amaral (In Memoriam)

ORIENTADOR

CAMPINAS - SÃO PAULO
Julho - 2001

i

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE



UNIDADE BC
N.º CHAMADA:
T/UNICAMP
P933i
V. 46242
TOMBO BC/
PROC. 16-392107
C G
PREC. R\$ 11,00
DATA 13/09/01
N.º CPD

**FICHA CATALOGRAFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DO IG - UNICAMP - IG**

CM00159913-3

P933i Prieto Cainzos, Rigoberto Lázaro
Integração de dados geofísicos e geológicos de Cuba Centro-Oriental: contribuições a cartografia e exploração mineral regional / Rigoberto Lázaro Prieto Cainzos.- Campinas,SP.: [s.n.], 2001.

Orientadores: Elisabete Maria Pascholati, Carlos Roberto de Souza Filho, Gilberto Amaral

Tese (doutorado) Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências.

1. Geofísica – Sensoriamento remoto - Cuba. 2. Geologia – Sensoriamento remoto - Cuba. 3. Processamento de Imagens – Técnicas Digitais. 4. Imagens – Interpretação. I. Pascholati, Elisabete Maria . II. Souza Filho, Carlos Roberto. III. Amaral Gilberto. IV. Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Geociências. V. Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

Rigoberto Lázaro Prieto Cainzos

**"INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS
DE CUBA CENTRO-ORIENTAL:
CONTRIBUIÇÕES A CARTOGRAFIA E EXPLORAÇÃO MINERAL REGIONAL"**

Orientadora: Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati

Co-orientador: Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho
Prof. D. Gilberto Amaral (In Memoriam)

Aprovada em: 16/07/01

Presidente: Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati

EXAMINADORES:

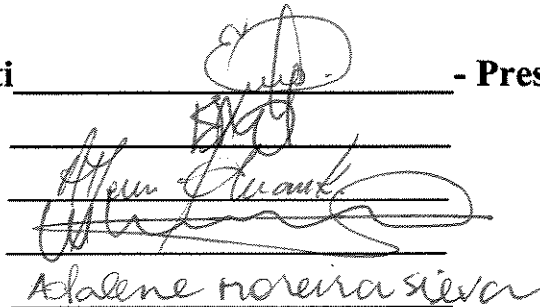
Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati _____ - **Presidente**

Prof. Dr. Elson Paiva de Oliveira

Prof. Dr. Alfonso Schrank

Prof. Dr. Wladimir Shukosky

Profa. Dra. Adalene Moreira Silva

The image shows four handwritten signatures, each written over a horizontal line. From top to bottom, the signatures correspond to: 1) Elisabete Maria Pascholati (President), 2) Elson Paiva de Oliveira, 3) Alfonso Schrank, and 4) Adalene Moreira Silva.

Campinas, 16 de julho 2001.

A mi madre, ejemplo de trabajo y dedicación
A mi padre (in memoriam), por realizar sus sueños

AGRADECIMENTOS

A mi madre, por su presencia constante en mi pensamiento, por todo el amor que me dá, por garantizar mi retaguardia.

A mi padre (in memorian), por el orgullo de haberte tenido y el ejemplo que me diste.

A Carmen, por el amor y la comprensión de estos años.

A mis hijas Maribel y Gretel, por la dolorosa y necesaria separación.

A toda mi familia en Cuba, por el apoyo que me dan, especialmente a mi prima Mirtha.

A Profa. Dra. Elisabete Maria Pascholati, obrigado “profa” pela orientação, apoio, confiança e por fazerme sentir parte da sua família.

Ao Prof. Gilberto Amaral (in memorian) pelo ensino e os momentos inesquecíveis.

Ao Prof. Dr. Carlos Roberto de Souza Filho pelo profissionalismo e por aceitar a co-orientação na hora certa.

A FAPESP (Processo 94/03700-0) pela bolsa de estudo e suporte financeiro da pesquisa.

Aos professores Dr. Álvaro Penteado Crosta (IG-UNICAMP), Dr. Alfonso Schrank (IG-UNICAMP) e Wladimir Shukosky (IAG-USP), pelas contribuições na banca de qualificação.

Ao professor Dr. Ardemiro Barros, sempre disposto em colaborar e pelas discussões de trabalho.

Aos professores do Instituto de Geociências (UNICAMP) pelo ensino e amizade nestes anos.

A Valdirene Pinotti, obrigado “Val” por teu sorriso e todo o apoio.

Aos funcionários da biblioteca do IG, em especial à Dora, Márcia, Cássia.

Aos todos os funcionários do IG, em especial a Juarez, Sr. Aníbal, Maurícia, Edinalva, Creuza e Tânia.

Aos analistas Ricardo Campos, Moacir Cornetti, Patrícia Leite, Paulo Ferrera e Odnilson.

Ao pessoal do laboratório de informática do IG-USP, pelo apoio na escanerização dos mapas.

A Irian, minha irmã brasileira.

A Solange, amiga de todas horas.

A Wilson “tonelada” e Cleiri, Marcelo “sorvetão” e Elisa, obrigado pela sincera amizade.

A todos meus colegas do IG que me fizeram passar anos inesquecíveis, especialmente Marcinha, César, Zulu, Ricardo “blau-blau”, Carlinha, Téo, Rodrigo, Aurélio, Marcelo, Marreco, Silvia.

A dupla Carlos- Bienvenido, por tirarme do serio quando precisava.

A Telma Aisengart e Maria Cristina Chaves Sartori da Geosoft Latinoamerica Ltda.

A Luis y Maritza, Electo y Maria Eugenia, gracias por todo el apoyo que me dieron en los primeros momentos.

A Héctor Yake, “padrino” no te defraude, venci la batalla.

A todos mis colegas del Instituto de Geología e Palentologia (IGP) en Cuba, en especial a Jorge Luis Chang, Odalys Abín, Lenia Montero, Antonio Oviedo e Arsenio Barrientos.

A la dirección técnica del IGP, por la liberación de la base de datos aerogeofísica.

A la Empresa de Geología de Camaguey, por el apoyo en los trabajos de campo.

A Carbeny Capote, por darme la posibilidad de un futuro.

A Chachi y Pepe, por la atención a mi madre.

A Huberto, Dania y familia en Cuba.

ÍNDICE

Capítulo 1. Introdução	1
1. 1. Considerações Gerais	1
1. 2. Objetivos	2
1. 3. Apresentação da área de estudo	2
1. 5. Referências Bibliográficas	3
Capítulo 2. Geologia do Território Cubano	5
2. 1. Introdução	5
2. 2. Origem e evolução geológica de Cuba	5
2. 2. 1. Esboço geral do modelo geológico cubano	5
2. 2. 2. Síntese geológica da área de estudo	6
2. 2. 3. Síntese tectôno-estrutural	15
2. 2. 4. Principais ocorrências minerais	16
2. 2. 5. Zoneamento gravi-magnetométrico e modelo físico-geológico do cinturão dobrado cubano	16
2. 2. 6. Resumo sobre a origem e evolução geológica de Cuba no contexto do Caribe	17
2. 3. Referências Bibliográficas	20
Capítulo 3. Levantamento Aeromagnético de Cuba Centro-Oriental. Processamento e Resultados	25
3. 1. Introdução	25
3. 2. Materiais e Métodos	25
3. 2. 1. Materiais	25
3. 2. 2. Métodos	27
3. 3. Resultados e Discussão	34
3. 3. 1. Resultados	34
3. 3. 2. Discussões	63
3. 4. Conclusões	70
3. 5. Referências Bibliográficas	75

Capítulo 4. Gravimetria de Cuba Centro-Oriental. Processamento e Resultados	81
4. 1. Introdução	81
4. 2 Materiais e Métodos	81
4. 2. 1 Materiais	81
4. 2. 2. Métodos	83
4. 3. Resultados e Discussões	84
4. 3. 1. Resultados	84
4. 3. 2. Discussão	101
4. 4. Conclusões	104
4. 5. Referências Bibliográficas	109
Capítulo 5. Levantamento Aerogamaespectrométrico de Cuba Centro-Oriental Processamento e Resultados	113
5. 1. Introdução	113
5. 2. Materiais e Métodos	113
5. 2. 1. Materiais	113
5. 2. 2. Métodos	115
5. 3. Resultados e Discussões	119
5. 3. 1. Resultados	119
5. 3. 2. Discussão	153
5. 4. Conclusões	155
5. 5. Referências Bibliográficas.	165
Capítulo 6. Modelagem 2-D de Dados Gravimétricos e Aeromagnéticos	169
6. 1. Introdução	169
6. 2. Materiais e Métodos	169
6. 2. 1. Materiais	169
6. 2. 2. Métodos	177
6. 3. Resultado e Discussões	180
6. 4. Conclusões	193
6. 5. Referências Bibliográficas	194

Capítulo 7. Análise integrada de resultados e mapeamento de áreas com potencial mineral	197
7. 1. Introdução	197
7. 2. Integração de Resultados	197
7. 2. 1. Classificação não supervisionada de dados geofísicos de Cuba Centro-Oriental	197
7. 2. 2. Mapa de integração dos dados geofísicos	213
7. 3. Integração de resultados e mapeamento de áreas com potencial mineral	221
7. 4. Conclusões	244
7. 5. Referências Bibliográficas	246
Capítulo 8. Conclusões	251

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Localização da área de estudo	3
Figura 2. 1. Mapa generalizado da constituição geológica de Cuba (substrato dobrado e neo-autóctone)	6
Figura 2. 2. Perfil geológico esquemático das principais estruturas do substrato dobrado em Cuba Centro-Oriental (região de Camaguey)	7
Figura 2. 3. Mapa geológico de Cuba Centro-Oriental	11
Figura 2. 4. Limite das bacias do arquipélago vulcânico	14
Figura 2. 5. Principais feições tectônicas em Cuba Centro-Oriental	16
Figura 2. 6. Cuba no contexto do Caribe	19
Figura 3. 1. Espectro de energia	26
Figura 3. 2. Mapa de campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	37
Figura 3. 3. Espectro de potência de campo magnético anômalo	39
Figura 3. 4. Mapa de redução ao pólo do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	43
Figura 3. 5. Mapa de continuação para cima (2.000m) do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	45
Figura 3. 6. Mapa de continuação para cima (10.000m) do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	47
Figura 3. 7. Mapa de susceptibilidade magnética do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	49
Figura 3. 8. Mapa de pseudogravidade do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	51
Figura 3. 9. Mapa de derivada horizontal em X do campo magnético anômalo, (sombreamento sintético 45⁰), Cuba Centro-Oriental	53
Figura 3. 10. Mapa de derivada horizontal em Y do campo magnético anômalo, (sombreamento sintético 45⁰), Cuba Centro-Oriental	55
Figura 3. 11. Mapa de derivada vertical do campo magnético anômalo, (sombreamento sintético 45⁰), Cuba Centro-Oriental	57
Figura 3. 12. Mapa de amplitude de sinal analítico do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	59
Figura 3. 13. Mapa de fase de analítico do campo magnético anômalo (sombreamento sintético 45⁰), Cuba Centro-Oriental	61
Figura 3. 14. Mapa de domínios do campo magnético anômalo (sombreamento sintético 45⁰), Cuba Centro-Oriental	65

Figura 3. 15. Esquema de lineamentos do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	71
Figura 3. 16. Esquema magneto-estrutural do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental	73
Figura 4. 1. Mapa de campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>), Cuba Centro-Oriental	85
Figura 4. 2. Espectro de potência da anomalia de <i>Bouguer</i>	87
Figura 4. 3. Mapa de continuação para cima (4.000m) do campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>), Cuba Centro-Oriental	89
Figura 4. 4. Mapa de continuação para cima (15.000m) do campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>), Cuba Centro-Oriental	91
Figura 4. 5. Mapa de derivada horizontal em X do campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>), Cuba Centro-Oriental, (sombreamento sintético 45 ⁰)	93
Figura 4. 6. Mapa de derivada horizontal em Y do campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>), Cuba Centro-Oriental, (sombreamento sintético 45 ⁰)	95
Figura 4. 7. Mapa de derivada vertical do campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>), Cuba Centro-Oriental, (sombreamento sintético 45 ⁰)	97
Figura 4. 8. Mapa de fase de sinal analítico do campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>), Cuba Centro-Oriental, (sombreamento sintético 45 ⁰)	99
Figura 4. 9. Esquema de domínios gravimétricos do campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>), Cuba Centro-Oriental	105
Figura 4. 10. Esquema de interpretação gravi-estrutural, Cuba Centro-Oriental	107
Figura 5. 1. Modelo digital de terreno com drenagem, Cuba Centro-Oriental	121
Figura 5. 2. Mapa de contagem total ($\mu\text{R/h}$), Cuba Centro-Oriental	125
Figura 5. 3. Mapa de concentrações de urânio (ppm), Cuba Centro-Oriental	127
Figura 5. 4. Mapa de concentrações de tório (ppm), Cuba Centro-Oriental	129
Figura 5. 5. Mapa de concentração de potássio (%), Cuba Centro-Oriental	131
Figura 5. 6. Mapa ternário (RGB), Cuba Centro-Oriental	135
Figura 5. 7. Mapa de potássio normalizado, Cuba Centro-Oriental	137
Figura 5. 8. Mapa de primeira principal componente gamaespectrométrica, Cuba Centro-Oriental	141
Figura 5. 9. Mapa de segunda principal componente gamaespectrométrica, Cuba Centro-Oriental	143
Figura 5. 10. Mapa de terceira principal componente gamaespectrométrica, Cuba Centro-Oriental	145
Figura 5. 11. Mapa de quarta principal componente gamaespectrométrica, Cuba Centro-Oriental	147

Figura 5. 12. Perfil radiométrico de verificação em calcáreos	157
Figura 5. 13. Calcáreo maciço sem alteração	157
Figura 5. 14. Calcáreo alterado (possível fosfatação ?)	159
Figura 5. 15. Perfil de verificação em cobertura cenozóica	159
Figura 5. 16. Cobertura cenozóica com intemperismo laterítico	161
Figura 5. 17. Corpo sienítico	161
Figura 5. 18. Corpo sub-vulcânico	163
Figura 6. 1. Mapa geológico, com perfis de modelagem	171
Figura 6. 2. Mapa residual de campo magnético anômalo (até 2. 000m), com perfis de modelagem	173
Figura 6. 3. Mapa residual de campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>) até 4.000m, com perfis de modelagem	175
Figura 6. 4. Modelo geológico-geofísico 2-D através do perfil A-A', Cuba Centro-Oriental	183
Figura 6. 5. Modelo geológico-geofísico 2-D através do perfil B-B', Cuba Centro-Oriental	187
Figura 6. 6. Modelo geológico-geofísico 2-D através do perfil C-C', Cuba Centro-Oriental	191
Figura 7. 1. Mapa de classificação não supervisionada de dados aeromagnéticos e gravimétricos, Cuba Centro-Oriental	201
Figura 7. 2. Mapa de classificação não supervisionada de dados gamaespectrométricos, Cuba Centro-Oriental	205
Figura 7. 3. Classificação não supervisionada de dados geofísicos em 3-D, Cuba Centro-Oriental	211
Figura 7. 4. Mapa integrado dos dados geofísicos (aeromagnetometria, gravimetria e gamaespectrometria), Cuba Centro-Oriental.	217
Figura 7. 5. Evolução do cinturão dobrado no contexto do Caribe no Neocomiano-Aptiano	219
Figura 7. 6. Assinatura gravimétrica em zonas de subdução de direção W	220
Figura 7. 7. Setores de maior ocorrência de ouro na área de estudo	223
Figura 7. 8. (a) Mapa geológico, ocorrências "Gaspar"	227
Figura 7. 8. (b) Mapa ternário, ocorrências "Gaspar"	227
Figura 7. 8. (c) Mapa de amplitude de sinal analítico, ocorrências "Gaspar"	227
Figura 7. 8. (d) Mapa de derivada vertical em Z, ocorrências "Gaspar"	227
Figura 7. 8. (e) Esquema de lineamentos, ocorrências "Gaspar"	229

Figura 7. 9. (a) Mapa geológico, ocorrências “Jaguey e La Mina”	231
Figura 7. 9. (b) Mapa ternário, ocorrências “Jaguey e La Mina”	231
Figura 7. 9. (c) Mapa de amplitude de sinal analítico, ocorrências “Jaguey e La Mina”	231
Figura 7. 9. (d) Mapa de derivada vertical em Z, ocorrências “Jaguey e La Mina”	233
Figura 7. 9. (e) Esquema de lineamentos, ocorrências “Jaguey e La Mina”	233
Figura 7. 10. (a) Mapa geológico, ocorrências “Florência e Golden Hill”	235
Figura 7. 10. (b) Mapa ternário, ocorrências “Florência e Golden Hill”	235
Figura 7. 10. (c) Mapa de amplitude de sinal analítico, ocorrências “Florência e Golden Hill”	235
Figura 7. 10. (d) Mapa de derivada vertical em Z, ocorrências “Florência e Golden Hill”	235
Figura 7. 10. (e) Esquema de lineamentos, ocorrências “Florência e Golden Hill”	235

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1. Modelo físico-geológico conceitual do cinturão dobrado cubano	17
Tabela 3. 1. Estatística dos dados aeromagnéticos originais e interpolados	35
Tabela 4.1. Valores de densidade dos complexos geológicos em Cuba Centro-Oriental	82
Tabela 5. 1. Resultados estatísticos das malhas originais e micro-niveladas dos elementos gamaespectrométricos	120
Tabela 5. 2. Auto-vetores por principais componentes de contagem total (CT), potássio (K), tório (Th) e urânio (U)	139
Tabela 5. 3. Auto-vetores em porcentagem obtidos por principais componentes de contagem total (CT), potássio (K), tório (Th) e urânio (U)	139
Tabela 5. 4. Estatística das variáveis contagem total (CT) e potássio (K) nas entidades geológicas	149
Tabela 5. 5. Estatística das variáveis contagem tório (Th) e urânio (U) nas entidades geológicas	151
Tabela 6. 1. Valores médios de densidade e susceptibilidade magnética das unidades geotectônicas que formam o substrato dobrado em Cuba Centro-Oriental	177
Tabela 6. 2. valores médios de densidade e susceptibilidade magnética das entidades geológicas em Cuba Centro-Oriental	178
Tabela 6. 3. Resultados da modelagem geológico-geofísica em 2-D do perfil A-A' (azimute 52 ^o)	185
Tabela 6. 4. Resultados da modelagem geológico-geofísica em 2-D do perfil B-B' (azimute 52 ^o)	189
Tabela 6. 5. Resultados da modelagem geológico-geofísica em 2-D do perfil C-C' (azimute 152 ^o)	193
Tabela 7. 1. Estatística da análise de grupamento (<i>cluster analysis</i>) das variáveis campo magnético (reduzido ao pólo) e gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>)	203
Tabela 7. 2. Estatística da análise de grupamento (<i>cluster analysis</i>) das variáveis CT, K, Th e U	207



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS
ÁREA DE METALOGÊNESE

**"INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS
DE CUBA CENTRO-ORIENTAL:
CONTRIBUIÇÕES A CARTOGRAFIA E EXPLORAÇÃO MINERAL REGIONAL"**

RESUMO

TESE DE DOUTORADO

Rigoberto Lázaro Prieto Cainzos

Cuba Centro-Oriental, foco deste estudo, abrange amplos setores das principais unidades geológicas documentadas no arquipélago, incluindo o arco de ilha Cretácico (AVC), os ofiolitos Mesozóicos, a margem continental da plataforma das Bahamas (Jurássico Superior-Cretáceo Superior) e a cobertura sedimentar Cenozóica. É uma área com características geológicas e potencial metalogenético notáveis, constituindo-se num excelente sítio para utilização e avaliação de métodos geofísicos voltados ao mapeamento geológico e a exploração mineral.

Com o objetivo de gerar subsídios para interpretação geológica regional, para a análise tectôno-estrutural e avaliar preliminarmente áreas com potencial para ouro em Cuba Centro-Oriental, este estudo foi dedicado ao processamento e interpretação de dados magnéticos, gravimétricos e gamaespectrométricos, oriundos de levantamentos aerogeofísicos realizados na região, na escala 1:50.000, entre 1979-1990.

Os dados aeromagnéticos foram processados através de filtros de redução ao pólo, continuação para cima, susceptibilidade magnética, pseudogravidade, sinal analítico e derivadas horizontal e vertical. A interpretação destes dados permitiu a confecção de: (i) um mapa de domínios magnéticos, onde 4 domínios regionais foram caracterizados, com destaque para o mapeamento de corpos plutônicos do AVC, rochas continentais da Plataforma das Bahamas, zona de sutura marginal e bacias do arco; (ii) um mapa de lineamentos, onde três sistemas regionais principais foram individualizados: o "Cubano" (NW-SE), "Camaguey" (NE) e "Banao" (N-S); (iii) um mapa de domínios magneto-estruturais, segundo o qual a área foi compartimentada em 9 domínios, relacionados às principais estruturas e processos da evolução geológico-tectônica em Cuba Centro-Oriental.

Os dados gravimétricos foram processados por meio de filtros de continuação para cima, sinal analítico e derivadas horizontal e vertical. A interpretação dos produtos obtidos permitiu a geração de: (i) um mapa de domínios gravimétricos, compreendendo 3 domínios principais, relacionados ao embasamento metamórfico da margem continental da Plataforma das Bahamas, a sedimentos continentais e oceânicos na zona de sutura e a corpos profundos e bacias do AVC; (ii) um mapa de domínios gravi-estruturais, contendo 6 domínios principais, relacionados às principais estruturas documentadas em Cuba Centro-Oriental.

Os dados aerogammaespectrométricos foram micro-nivelados e integrados sob a forma de mapas ternários, potássio anômalo e principais componentes. A partir desses mapas foi possível estudar o comportamento radiogeoquímico da área de estudo. A interpretação dos dados demonstrou que (i) setores com altas concentrações de urânio relacionam-se a coberturas cenozóicas do neo-autóctone, sedimentos continentais fosfatados da Plataforma das Bahamas e afloramentos de corpos plutônicos do AVC; (ii) as altas concentrações de tório abrangem extensas áreas relacionadas ao desenvolvimento de crostas lateríticas em seqüências cenozóicas vinculadas ao neo-autóctone; (iii) as concentrações de potássio caracterizam as faixas de rochas plutônicas e vulcânicas do arco. O potássio é o radioelemento dominante na área de estudo.

A modelagem 2-D de dados gravimétricos e aeromagnéticos foi realizada segundo três perfis representativos, permitindo o estabelecimento das fontes responsáveis pelas anomalias geofísicas e a geração de um modelo geológico-geofísico para a área. O modelo possibilitou a clara separação entre as unidades arco vulcânico-associação ofiolítica, e a distinção destas unidades oceânicas da unidade continental da Plataforma das Bahamas.

A integração da base de dados foi realizada de duas formas: (i) classificação não supervisionada dos dados magnéticos-gravimétricos e gamaespectrométricos, de onde obteve-se mapas de classes geofísicas relacionadas às formações geológicas e ambientes tectono-estruturais da área; (ii) fusão dos mapas temáticos (oriundos do processamento e interpretação dos dados geofísicos), em um mapa integrado, a partir do qual foi possível individualizar três faixas geológico-geofísicas relacionadas à evolução do cinturão dobrado.

A integração de mapas temáticos à dados pontuais de ocorrências de ouro, com ênfase em três setores utilizados como referência, permitiu a indicação de cinco novas áreas-alvo para prospecção desse metal em Cuba Centro-Oriental.



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS/

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOCIÊNCIAS

ÁREA DE METALOGÊNESE

**"INTEGRAÇÃO DE DADOS GEOFÍSICOS E GEOLÓGICOS
DE CUBA CENTRO-ORIENTAL:
CONTRIBUIÇÕES A CARTOGRAFIA E EXPLORAÇÃO MINERAL REGIONAL"**

ABSTRAC

TESE DE DOUTORADO

Rigoberto Lázaro Prieto Cainzos

The central-eastern portion of Cuba, the focus of this study, comprises broad sectors of key geologic units recognized in the island, including the Cretaceous volcanic arc (CVA), the Mesozoic ophiolites, the margin of the Bahamas continental platform (Upper Jurassic-Upper Cretaceous) and the Cenozoic cover. The region's unique geologic and metallogenic characteristics makes it an attractive site to evaluate geophysical methods and their usefulness in geologic mapping and mineral exploration.

This project involves airborne magnetic, gravimetric and gammaspectrometric data processing and interpretation, aiming to provide a chief support for regional lithologic, structural and gold exploration investigations in central-eastern Cuba. The data employed in this study was acquired between 1979-1990, at 1:50.000 scale.

The magnetic data was processed using filters to reduce data to magnetic pole, upward continuation, magnetic susceptibility, pseudo-gravity, analitic signal and horizontal (x or y) and vertical derivatives. The information yielded through these processing techniques was interpreted as: (i) a map of magnetic domains, where 4 regional domains were characterized, comprising plutons of the CVA, continental rocks of the Bahamas platform, the marginal suture zone and basins within the arc; (ii) a map of lineaments, where three main tectonic systems were mapped, including the "Cubano" (NW-SE), "Camaguey" (NE) and "Banao" (N-S); (iii) a map of magnetic-structural domains, in which the area were subdivided into 9 domains related to the main geologic units and structures of central-eastern Cuba.

The gravimetric data was processed using filters that provide upward continuation, analitic signal and horizontal (x or y) and vertical derivatives. Interpretation of the results allowed to assemble: (i) a map of gravimetric domains, comprising 3 main domains related to the metamorphic basement that constitute the margin of the Bahamas continental platform; continental and oceanic sediments within the suture zone and deep plutons and basins of the

CVA; (ii) a map of gravimetric-structural domains, with 6 domains related to the main geologic features found in central-eastern Cuba.

The gamma-spectrometric data were micro-leveled and integrated as ternary maps, anomalous potassium maps and maps derived through principal component analysis. The examination of the information provided in these maps showed that: (i) sectors with high U concentrations are related to Cenozoic covers of the Neo-autochthonous, phosphate-rich continental sediments of the Bahamas platform and plutons of the AVC; (ii) high concentrations of Th encompass extensive areas associated to lateritic crusts developed over Cenozoic sequences of the Neo-autochthonous; (iii) high concentrations of K characterize tracts of volcanic and plutonic rocks of the arc. The potassium is the dominant radioelement in the study area.

The 2-D modelling of the gravimetric and magnetic data were conducted along three representative profiles in the area, allowing to establish the sources responsible for the geophysical anomalies and the proposal of a geologic-geophysical model for the study area. Such model yielded a comprehensible distinction between units of the volcanic arc and the ophiolite complex, and also the distinction among these oceanic units and the continental unit of the Bahamas platform.

Merging the geophysical database involved the following techniques: (i) unsupervised classification of the magnetic-gravimetric and gamma-spectrometric data, which yielded a map of geophysical classes related to several geologic formations and tectonic features of the area; (ii) fusion of thematic maps derived from processing and interpretation of geophysical data, which provided an integrated map with three geologic-geophysical tracts correlated to the evolution of the regional fold-belt.

The integration of the thematic maps with dot maps of gold occurrences and using three sectors as controls, yielded five new areas for gold prospecting in central-eastern Cuba.

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1. 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

No final do século XIX iniciou-se o interesse pela relação entre a geologia e as jazidas minerais em Cuba. No século passado, a geofísica, ferramenta fundamental para esse conhecimento, foi utilizada na pesquisa de jazidas de ouro e, posteriormente, na de outros recursos materiais metálicos e não metálicos, levando-se em consideração os interesses do mercado.

Com o objetivo de se obter um maior conhecimento geológico de Cuba, foi realizado um levantamento aerogeofísico (magnetometria e gamaespectrometria), em toda a ilha, entre os anos de 1979-1990, como parte de um programa de cooperação entre organismos cubanos e russos. Desta forma, o levantamento geológico então existente, na escala de 1:250.000, passou à escala de 1:50.000.

A área selecionada para este estudo, Cuba Centro-Oriental, abrange amplos setores do Arco de Ilha Cretácico, ofiolitos Mesozóicos, a Margem Continental da Plataforma das Bahamas (Jurássico Superior-Cretáceo Superior) e a cobertura sedimentar Cenozóica (Iturralde-Vinent 1994). Os resultados do levantamento aerogeofísico nessa área foram tratados na forma convencional, acompanhados de interpretações estruturais executadas manualmente e expostos nos relatórios apresentados por Liubi e Vasilev (1981), Liubi e Martinova (1982), Martinova e Torubarov (1985), Prieto e Brodovoi, (1986), Russanov e Prieto (1987).

A utilização de processamento digital de imagens e sistemas de informação georeferenciada nos dados geofísicos, aliada à informação geológica disponível, permite a extração e análise de dados geológicos, ampliando consideravelmente a qualidade dos resultados obtidos, logrando expor situações geológicas não conhecidas e fornecendo uma visão regional ao mapeamento básico tradicional, executado.

1. 2. OBJETIVOS

A tese tem como linha de abordagem, através da integração de dados geofísicos, a estudar a porção centro-oriental de Cuba, relacionada à evolução do Arco de Ilha Cretácico, visando a análise geológico-estrutural e, subordinadamente, as implicações dos resultados para a prospecção de depósitos minerais.

Os principais objetivos são:

- i) Ampliar qualitativa e quantitativamente as informações sobre a região de estudo com vistas a apoiar a modelagem geológico-estrutural da área;
- ii) Selecionar domínios geofísicos que contribuam à correlação com os dados geológico-estruturais na área;
- iii) Confeccionar um esquema de integração para Cuba Centro-Oriental, com base nos resultados do processamento, interpretação e modelagem dos dados geofísicos;
- iv) Propor áreas potenciais para a ocorrência de mineralizações de ouro e metais base.

1. 3. APRESENTAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Cuba é o maior arquipélago das Antilhas Maiores, separada a norte dos Estados Unidos pela Plataforma Florida-Bahamas, a oeste da Península de Yucatán pelo Golfo de México, a leste da Espanhola pelo Paço dos Ventos e, a sul, encontra-se banhada pelo Mar do Caribe.

A área de estudo localiza-se na porção centro-oriental do país, delimitada pelas coordenadas 20° 30' N - 22° 00' N e 77° 00' W - 79° 30' W (Figura 1. 1), com uma extensão aproximada de 84.133 km². As cidades mais importantes são Ciego de Avila, Camaguey e Las Tunas.

O relevo da área é, em geral plano, apresentando setores localmente elevados. A drenagem é constituída por rios curtos e de escasso caudal. O clima é tropical com temperatura média de 28 graus Celsius e precipitação de acordo com o período, seco (novembro-abril) e chuvoso (maio-outubro).

O setor favorece a presença de situações geológico-estruturais favoráveis à formação de depósitos minerais de ouro e metais base.

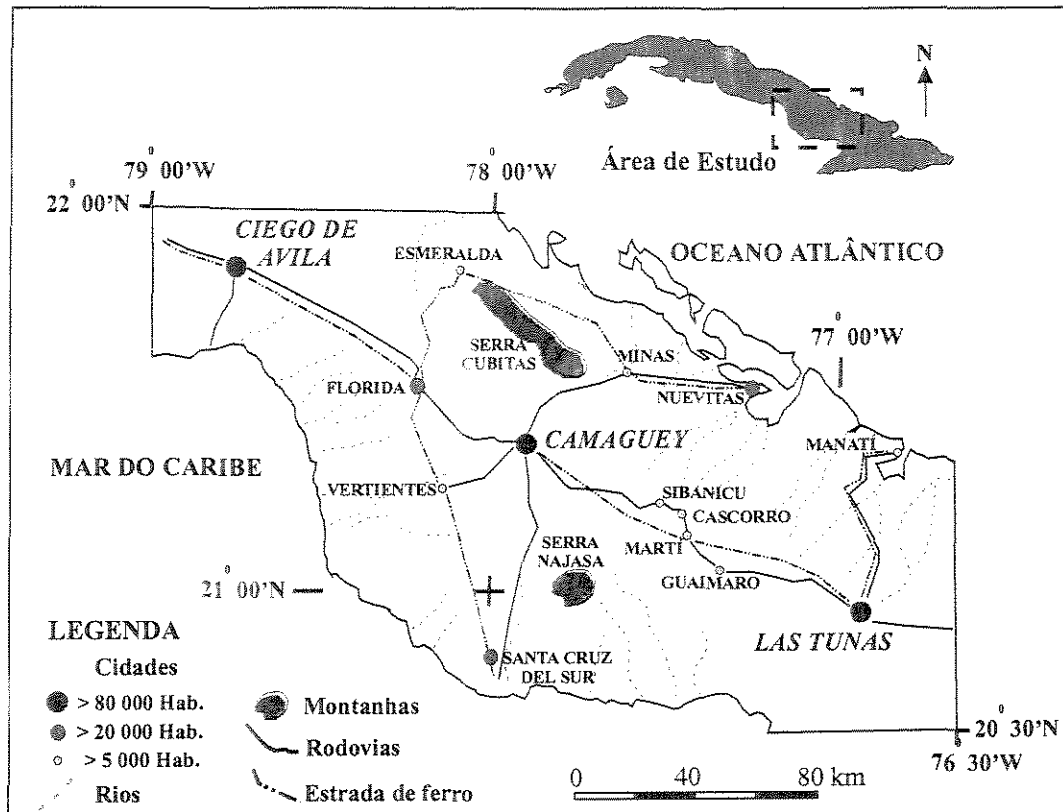


Figura 1. 1. Localização da área de estudo.

1. 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Iturralde-Vinent, M. A. 1994. Introduction to Cuban Geology and Geophysics. In: *Cuban Ophiolites and Volcanic Arc. Project 364: Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Terrenes in the Circum Caribbean Realm*, Ciudad de la Habana, p. 3-35.
- Liubi, L. I. e Martinova, T. V. 1982. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC), en el territorio de la provincia de Camagüey, escala 1:50 000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).
- Liubi, L. I. e Vasilev, Y. 1981. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC), en el territorio de la provincia de Santa Clara, escala 1:50 000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).

- Martinova, T. V. e Torubarov, V. 1985. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC), en el territorio de la provincia de Las Villas, escala 1:50 000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).
- Prieto, C. R. L. e Brodovoi, R. 1986. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC), en el sector Nuevitas-Guaimaro, escala 1:50 000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).
- Russanov, V. e Prieto, C. R. L. 1987. *Informe sobre los resultados de la Red de Apoyo Aerogeofísica Nacional, escala 1:50 000*. Ciudad de La Habana, IGP (Relatório técnico-econômico).

CAPÍTULO 2. GEOLOGIA DO TERRITÓRIO CUBANO

2. 1. INTRODUÇÃO

A geologia de Cuba é considerada como uma das mais complexas da região do Caribe (Iturralde-Vinent *et al.* 2000). A partir da década de 60, o arquipélago passou a ser estudado sistematicamente, através de levantamentos geológicos básicos conduzidos por geólogos cubanos e do antigo bloco socialista (Furrazola *et al.* 1964; Khudoley e Meyerhoff 1971, Shein. 1974 e Puscharowski *et al.* 1989). Recentemente, a geologia do território cubano tem sido tratada num contexto mais amplo, principalmente quanto ao seu papel na origem e evolução do Caribe (Ross e Scotese 1988; Pindell *et al.* 1988; Iturralde-Vinent 1997; Meschede e Frisch 1998).

O objetivo deste capítulo é o de sumarizar o conhecimento sobre a geologia de Cuba, com ênfase na área de estudo, gerando assim uma base para as interpretações e discussões dos temas abordados nos capítulos seguintes.

2. 2. ORIGEM E EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DE CUBA

2. 2. 1. Esboço geral do modelo geológico cubano

A constituição geológica de Cuba, segundo o modelo geológico de Iturralde-Vinent (1997) apresenta dois níveis estruturais principais reconhecidos no arquipélago: o substrato dobrado e o neo-autóctone (Figura 2. 1).

O **substrato dobrado** (Campaniano Médio até Eoceno Superior) é formado por diferentes unidades, variavelmente alóctones, de natureza continental e oceânica. Os terrenos continentais são representados por núcleos de alto grau metamórfico (bloco “Yucatan”) e pela Plataforma das Bahamas. Os terrenos de natureza oceânica incluem os ofiolitos setentrionais e os arcos insulares, sendo o maior do Cretáceo, e o menor do Paleógeno.

O **neo-autóctone** (Eoceno Superior-Quaternário) compreende rochas e estruturas geradas posteriormente à consolidação do substrato dobrado (Eoceno superior), quando dominaram

movimentos verticais que levaram à formação de blocos com espessuras de sedimentos de centenas a milhares de metros.

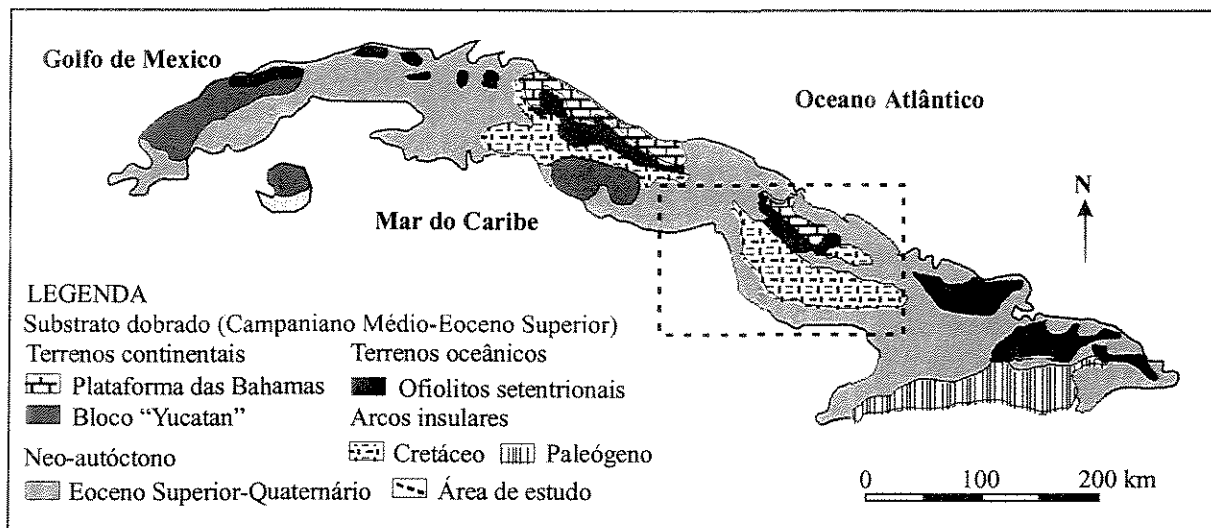


Figura 2. 1. Mapa generalizado da constituição geológica de Cuba (substrato dobrado e neo-autóctone), modificado de Iturralde-Vinent (1997).

2. 2. 2. Síntese geológica da área de estudo

A área de estudo Cuba Centro-Oriental, apresenta exposições dos dois níveis estruturais propostos por Iturralde-Vinent (1997): o substrato dobrado e o neo-autóctone.

O substrato dobrado é constituído por diversas unidades alóctones, de natureza continental e oceânica, cuja origem e evolução está relacionada a processos orogénicos ocorridos fora dos limites atuais do território cubano. À unidade de natureza continental pertencem os terrenos da Plataforma das Bahamas (Zona Remédios) e Seqüências do Protocaribe. As unidades de natureza oceânica incluem partes da crosta antiga do Caribe (ofiolitos do Cinturão Setentrional) e o Arco Vulcânico Cretáceo (Figura 2. 2). O neo-autóctone é representado por rochas e estruturas desenvolvidas principalmente na posição atual de Cuba.

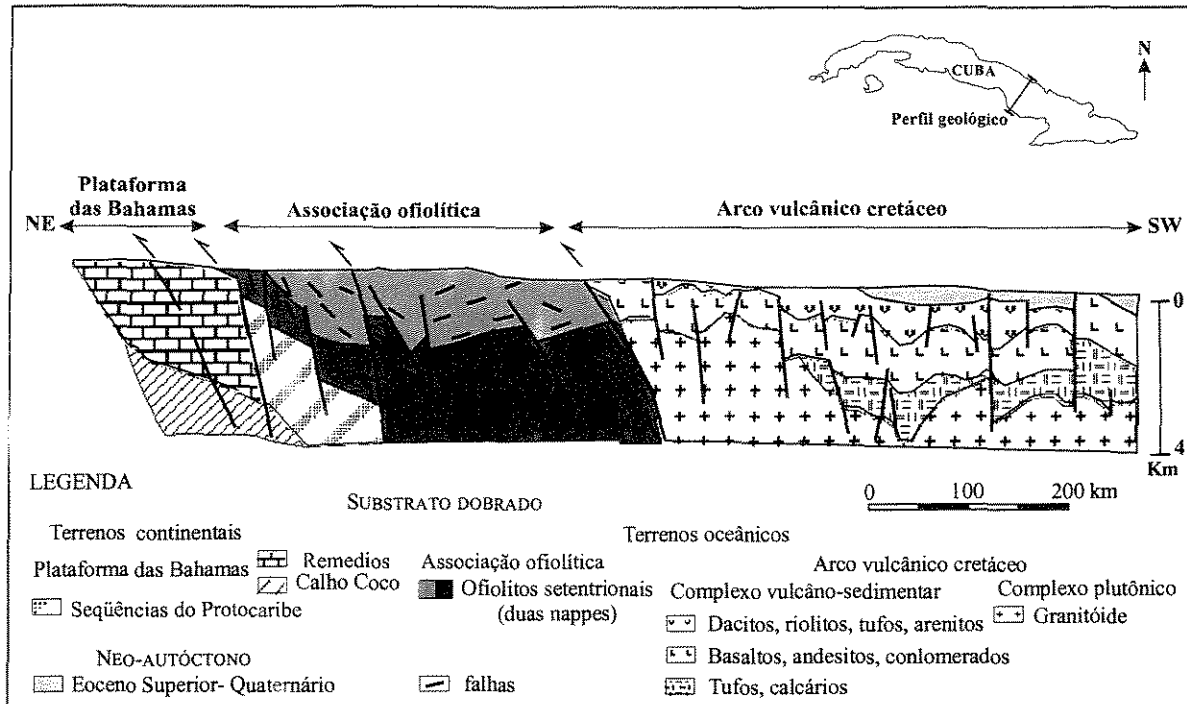


Figura 2. 2. Perfil geológico esquemático das principais estruturas do substrato dobrado em Cuba Centro-Oriental (região de Camaguey), modificado de Iturralde-Vinent *et al.* (2000).

SUBSTRATO DOBRADO

- De natureza continental

A **Plataforma das Bahamas (PB)** aparece ao norte de Cuba, sendo constituída por zonas dobradas com estratigrafia própria, denominadas Canal Velho das Bahamas, Calho Coco e Remédios (esta última, na área de estudo).

A Zona Remédios situa-se na periferia meridional da Plataforma das Bahamas e é composta por seqüências de até 2000m de calcários e dolomitos (Figuras 2. 2; 2. 3), formados em águas pouco profundas (Díaz *et al.* 1997). Estas rochas estão intensamente deformadas por falhas de cavalgamento e dobras.

As **Seqüências do Protocaribe (SP)** encontram-se numa faixa dobrada entre a Plataforma das Bahamas (Zona Remédios) e os terrenos alóctones de natureza oceânica (ofiolitos, arco vulcânico). Esta faixa, hoje conhecida como zonas Camajuaní e Placetás (Furrazola e Gil 1997),

foi originada pela compressão dos sedimentos e crosta protocaribenha, como consequência da colisão do alóctono oceânico contra a margem continental das Bahamas. As SP compreendem calcários estratificados, dolomitos e basaltos na base, com espessuras de milhares de metros (Figuras 2. 2; 2. 3).

- **De natureza oceânica**

(a) ASSOCIAÇÃO OFIOLÍTICA DO CINTURÃO SETENTRIONAL

A **Associação Ofiolítica do Cinturão Setentrional (AO)**, ou **ofiolito Camaguey** (Figuras 2. 2; 2.3), forma uma faixa com geometria em arco, de aproximadamente 1000 km². Dados oriundos de sondagem profunda e gravimetria indicam que a espessura de rochas ultrabásicas que compõem este ofiolito aumentam progressivamente de norte para sul, podendo chegar a pelo menos 5 km na região de Camaguey (Iturralde-Vinent *et al.* 2000).

O ofiolito Camaguey representa uma *mélange* tectônica e encontra-se em contato tectônico, a N-NE, com unidades da Plataforma das Bahamas (Sequências do Protocaribe e Zona Remédios), através de um sistema de empurrões controlados por duas nappes principais. A norte, as falhas de empurrão apresentam mergulhos variáveis de 30° a 45°, para SW, os quais aumentam progressivamente na porção sul do ofiolito, onde se tornam sub-verticais a verticais (Figura 2. 2). A fase final de colocação do ofiolito sobre a Plataforma das Bahamas começou no Paleoceno e durou até o Eoceno Superior (Iturralde-Vinent *et al.* 2000).

As duas nappes principais compreendem uma sucessão ofiolítica similar, contendo serpentinitos, peridotitos, gabros, basaltos e sedimentos pelágicos. A nappe inferior distingue-se da superior, pelo conteúdo maior de sedimentos (e.g., unidade Sierra de Camaján, a norte de Camaguey).

Dentre os diversos ofiolitos descritos na região norte do Caribe, o de Camaguey é o que possui a sequência mais completa (Iturralde-Vinent *et al.* 2000), apresentando exposições dos complexos peridotítico, transicional, cumulático e vulcano-sedimentar.

O complexo peridotítico é composto principalmente por harzburgitos, mas contém ainda websteritos, lherzolitos, raros dunitos e ocorrências isoladas de cromita. Localmente, diques gabróicos cortam as sequências de harzburgitos. A serpentinização que atingiu as rochas deste

complexo varia, em intensidade, de fraca (onde a textura magmática das rochas aparecem preservadas) a muito forte (quando as rochas apresentam-se completamente alteradas).

O complexo cumulático é o mais desenvolvido do ofiolito. Olivina-gabros, noritos, troctolitos, assim como anortositos, formam grandes corpos contendo texturas de acamamento (*layering*) magmático. Na partes inferiores do complexo, rochas ultramáficas (lherzolitos, websteritos, harzburgitos e poucos dunitos) ocorrem entres os cumulados. Diques de gabros, plagioclasitos e plagiogranitos também foram documentados neste complexo.

Entre o complexo peridotítico e cumulático existe uma zona de transição, contendo uma mistura de rochas ultramáficas e corpos irregulares, além de diques de gabro e plagioclasito.

Existem raras exposições de enxames de diques em Cuba Central. A oeste de Minas (ver Figura 1. 1), ocorre uma série de diques doleríticos que foram interpretados por Iturralde-Vinent *et al.* (2000) como 'sheeted dikes'.

O complexo vulcano-sedimentar da sequência ofiolítica aparece sob a forma de lascas tectônicas em diversas localidades. Uma seção de basaltos, hyaloclastitos, cherts e siltitos – Formação Albaiza – aflora sob a forma de blocos isolados, de dimensões kilométricas, a sul da Serra de Camaján. Na porção NW da área, próximo a Esmeralda (ver Figura 1. 1), fatias de calcários e cherts hemipelágicos encontram-se inclusas em serpentinitos (Formação Mate Prieto). A NE de Camaguey, ocorre uma grande lasca tectônica contendo xistos verdes, quartzo-micaxistos, calcários e xistos carbonosos.

Corpos de cromita podiforme são abundantes ao norte de Camaguey. Esses corpos, alguns dos quais compreendem depósitos de cromita de granulção média (~30% Cr₂O₃), estão relacionados a diferentes níveis estruturais no ofiolito, e têm, como principais rochas hospedeiras, peridotitos e dunitos. A maior parte dos corpos de cromita situa-se na zona de transição entre os peridotitos e rochas básicas ricas em feldspato, assim como nas porções inferiores do complexo cumulático. Em Meseta San Felipe, carapaças lateríticas derivadas da alteração supergênica de rochas ultramáficas mostram enriquecimento em Ni.

Existem divergências sobre a origem dos ofiolitos de Camaguey. Alguns autores (Shein 1974, Somin e Millan 1981, Ando *et al.* 1996) os relacionam ao complexo de subdução do arquipélago vulcânico cretáceo; outros (Pushcharowsky *et al.* 1989, Iturralde-Vinent 1997) consideram os ofiolitos como relictos de uma bacia de retro-arco.

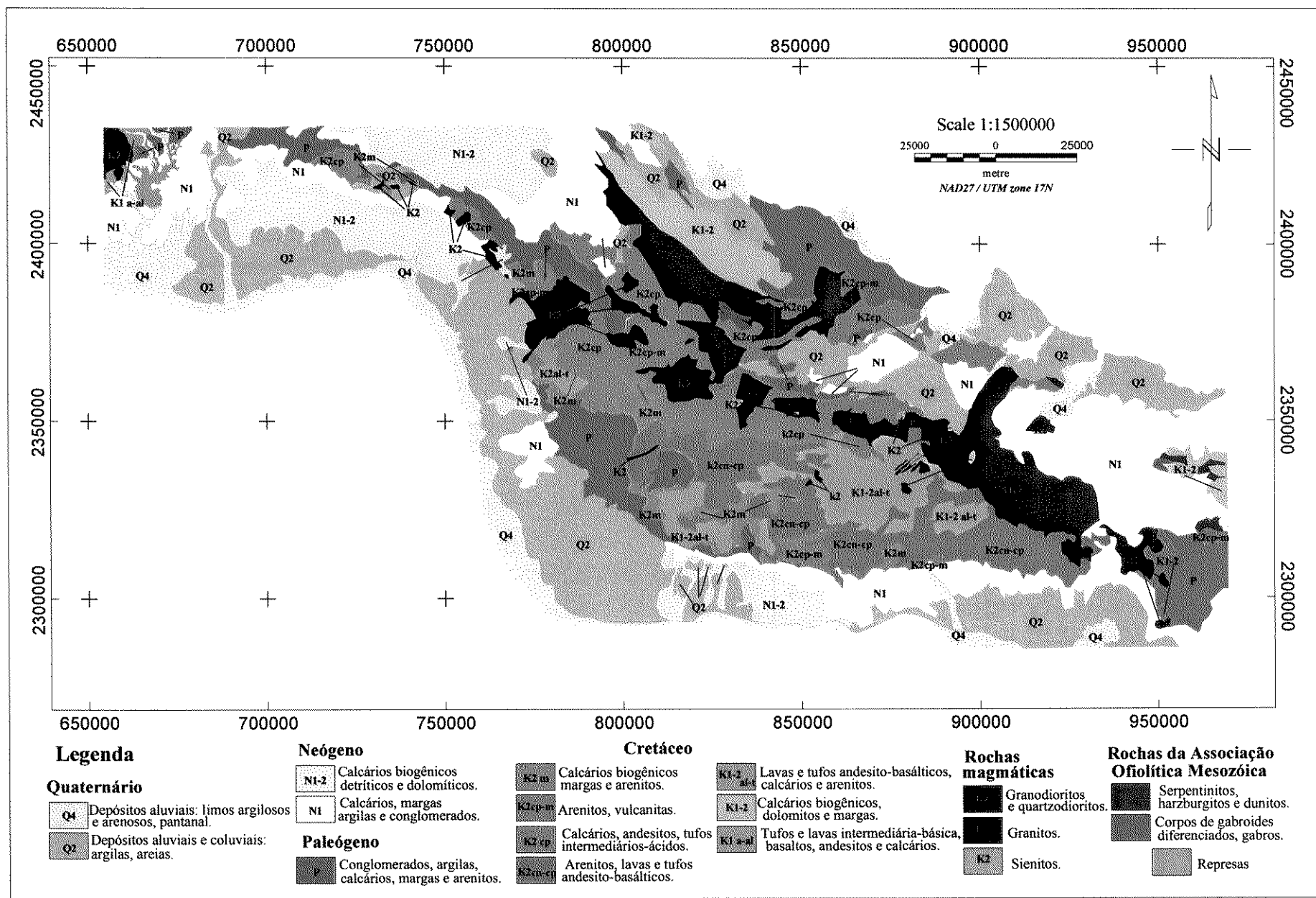


Figura 2. 3. Mapa geológico de Cuba Centro-Oriental (modificado de Puscharowsky, 1988).

b) ARCO VULCÂNICO CRETÁCEO (AVC)

O Arco Vulcânico Cretáceo recobre tectonicamente os ofiolitos Camaguey (Figura 2. 2). O contato geralmente coincide com falhas de cavalgamento NW-SE (Rumo Cubano), apresentando zonas com foliação penetrativa ou uma mistura complexa e caótica de blocos de rochas ofiolíticas e rochas derivadas do arco.

As rochas do arco podem ser caracterizadas como as de um antigo arquipélago de ilhas vulcânicas separadas por depressões e canais de água de diferente profundidade, onde coexistiram vulcões submarinhos e insulares. Na área de estudo, são reconhecidos os complexos vulcano-sedimentares e plutônicos, com limites estratigráficos e tectônicos definidos (Figuras 2. 2; 2. 3).

- Complexo vulcano-sedimentar

Na área de estudo, as rochas do complexo vulcano-sedimentar podem ser agrupadas em duas seqüências, que correspondem a duas bacias do antigo arquipélago vulcânico: a bacia de retro-arco e a bacia axial (Figura 2. 4).

A bacia de retro-arco é constituída por seqüências onde predominam rochas sedimentares com conteúdo de detritos vulcânicos, relacionadas à rochas da associação ofiolítica. Lavas e corpos sub-vulcânicos são pouco comuns nesta seqüência.

A bacia axial do arco engloba aparelhos vulcânicos com predomínio de lavas e corpos sub-vulcânicos e intercalações de tufos e rochas sedimentares. Associados a esses aparelhos, essencialmente na interface entre rochas vulcânicas e plutônicas, processos de metamorfismo de contato e alterações metassomáticas são freqüentes.

O complexo vulcano-sedimentar é formado, na base, por seqüências de vulcanismo básico com tendência alcalina, geradas em ambiente submarinho. No topo, o complexo compreende rochas de composição intermediária-ácida (magmas riolíticos e dacíticos), desenvolvidas em ambiente sub-marinho pouco fundo até subaéreo (Piñero *et al.* 1997).

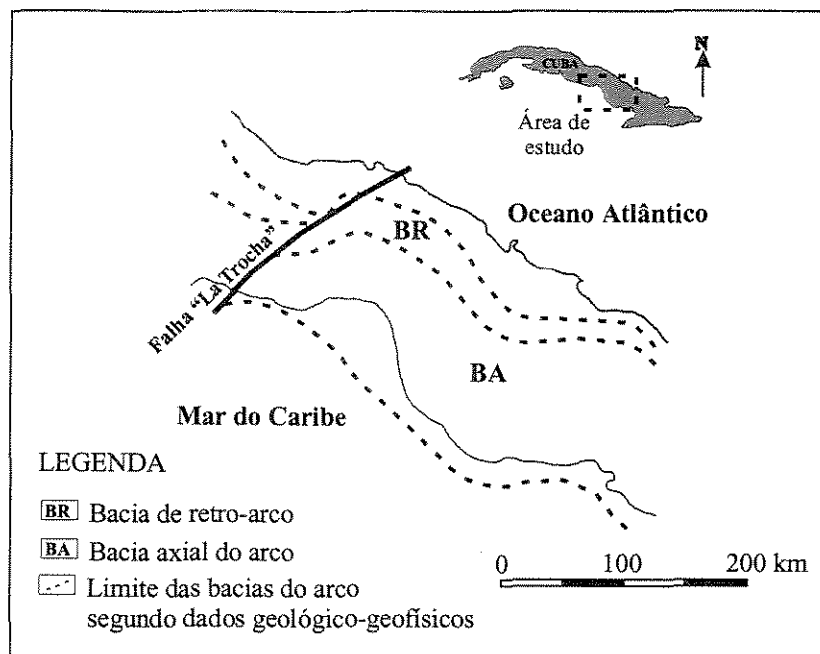


Figura 2. 4. Limite das bacias do arquipélago vulcânico (modificado de Iturralde-Vinent 1997).

- Complexo plutônico

As rochas plutônicas contidas na área de estudo, de acordo com suas características petroquímicas, foram divididas em três séries: calco-alcalina normal, calco-alcalina sódica e alcalina (Marí 1997, Pérez e Sukar 1997).

A série calco-alcalina normal possui a maior extensão areal. Seu conteúdo de K_2O varia lateralmente, aumentando na região Camaguey-Las Tunas. É constituída por rochas do complexo tonalito-granodiorítico (dioritos quartzíferos, monzodioritos e raramente gabro-dioritos) (Figura 2. 3).

A série calco-alcalina sódica apresenta um desenvolvimento escasso no na área de estudo, sendo constituída pelo complexo gabro-plagiogranítico.

A série alcalina somente é reconhecida na região de Camaguey, sendo caracterizada por altas concentrações de K_2O , que se sobrepõem às de Na_2O . Esta série é representada pelo complexo gabro-sienítico, constituído principalmente por rochas sieníticas.

NEO-AUTÓCTONE

O neo-autóctone é constituído por rochas e estruturas formadas posteriormente à consolidação do substrato dobrado (Eoceno Superior-recente), compreendendo extensas coberturas e potentes espessuras de rochas cenozóicas (Figuras 2. 2; 2. 3).

Segundo Iturralde-Vinent (1997), os movimentos verticais oscilatórios predominantes desta etapa, provocaram a formação de uma estrutura de blocos elevados a diferente altitude. Blocos de altitude positiva, apresentam pouca a nenhuma cobertura, no entanto os de altitude negativa apresentam até 3000 m de espessura de sedimentos. Neles são reconhecidos três ciclos de transformação paleo-geográfica, começando nas bacias com predomínio de sedimentos clásticos e concluindo com predomínio de calcários.

2. 2. 3. Síntese tectôno-estrutural

O mapa Cosmogeológico de Cuba na escala de 1:500 000 (Capote *et al.* 1992), apresenta a idade relativa dos principais tectono-lineamentos de Cuba, e é até hoje utilizado como base para interpretações tectono-estruturais. Considerando a terminologia adotada neste mapa, são a seguir expostos os principais sistemas de lineamentos presentes na área de estudo (Figura 2. 5):

- (i) Sistema “Cubano”: de direção NW-SE, é representado geralmente por falhas normais relacionadas à evolução da faixa dobrada do arco. Estas falhas exerceram um forte controle no magmatismo do arco, sendo seu maior expoente a falha “Cubana Axial”;
- (ii) Sistema “Camaguey”: de direção NE, é representado por falhas transtensivas profundas, bem expressas pelo relevo e pela geologia. Essas falhas separam blocos estruturais distintos e possivelmente foram reativadas sucessivamente durante a evolução da região. As falhas mais representativas deste sistema são as de “La Trocha” e “Camaguey” ;
- (iii) Sistema “Banão”: de direção N-S, compreende falhas com movimentação vertical, reversa e normal, relacionadas ao neo-autóctone .

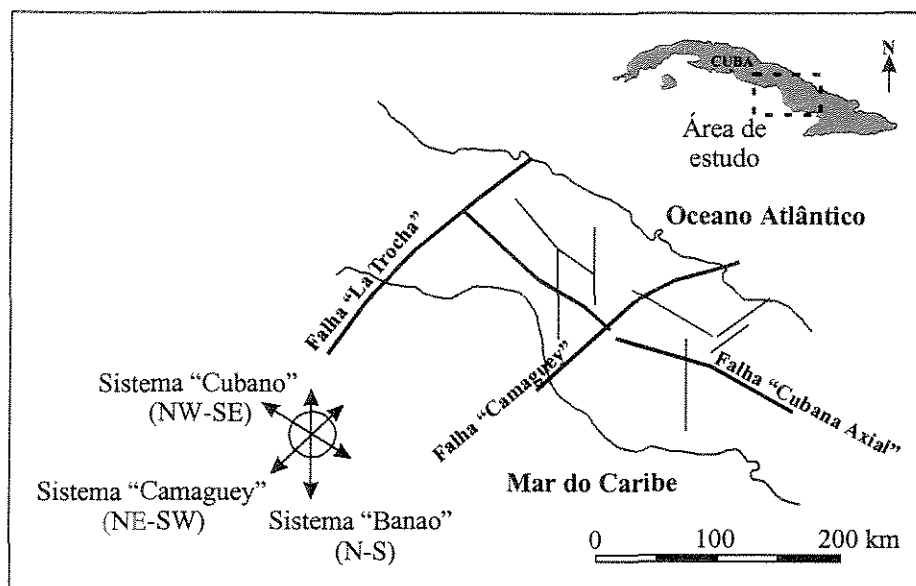


Figura 2. 5. Principais feições tectônicas em Cuba Centro-Oriental (modificado de Iturralde-Vinent 1997).

2. 2. 4. Principais ocorrências minerais

Na área de estudo, o arco vulcânico cretáceo pode ser considerado a unidade geotectônica com maior potencial metalogenético. Segundo Capote (1999), as principais ocorrências minerais no setor são devidas a mineralização hidrotermal associada à formação do AVC, estando constituídas por pequenas jazidas e majoritariamente ocorrências de ouro epitermal, ouro em veios, ouro escarnítico, cobre-molibdênio porfírico e ferro escarnítico, típicos de zonas de subducção e relacionados a magmas de composição ácida-intermediária.

2. 2. 5. Zoneamento gravi-magnetométrico e modelo físico-geológico do cinturão dobrado cubano

No trabalho de zoneamento gravi-magnetométrico e modelo físico-geológico conceitual do cinturão dobrado cubano (Pardo 1994), a área de estudo foi considerada como parte do megabloco central e constituída fundamentalmente por 3 domínios geológico-geofísicos (Tabela 2.1): (i) a borda setentrional do cinturão dobrado, composta pelos complexos meridionais da Plataforma das Bahamas; (ii) a mélangé ofiolítica do Cinturão Setentrional alóctone, e (iii) as

faixas dobradas vulcano-plutônicas, formadas por rochas do Arco Vulcânico Cretáceo. Ainda segundo Pardo (op. cit.), esses domínios dispõem-se paralelamente, de norte a sul. O domínio mais setentrional é constituído por depósitos sedimentares do arco; o domínio central inclui o eixo principal dos corpos intrusivos (granitóides) e o domínio sul compreende grandes espessuras de rochas vulcano-sedimentares e corpos sub-vulcânicos.

Tabela 2. 1. Modelo físico-geológico conceitual do cinturão dobrado cubano (modificado de Pardo, 1994).

Faixas geológico-geofísicas	Unidades geológicas	Litotipos	Campo gravimétrico regional (10^{-5} m/s²)	Campo magnético anômalo regional (miliOesterd)
Borda setentrional do cinturão dobrado	Plataforma das Bahamas	Calcários, evaporitos, calcários biogênicos	Suave, com valores positivos altos (20 - 60)	Suave, com valores baixos, positivos (0-2)
Melange ofiolítica alóctone	Ofiolitos setentrionais	peridotitos, gabros, serpentinitos	Contínuo, com valores positivos baixos (10 - 20)	Contínuo, com valores positivos baixos (0- -2); ocasionalmente alternados
Faixas dobradas vulcano-plutônicas	Arco vulcânico	Granitóides e rochas vulcano-sedimentares de composição básica a ácida	Porções setentrionais e meridionais com valores positivos e ocasionalmente negativos. Porção central com intensos valores máximos isométricos	Porção setentrional com valores positivos e negativos alternados. Porção central com valores positivos baixos e contínuos, os quais tornam-se mais intensos a sul

2. 2. 6. Resumo sobre a origem e evolução geológica de Cuba no contexto do Caribe

Diversos modelos sobre a origem e evolução do Caribe têm sido propostos nos últimos anos, destacando-se os modelos de Ross e Scotese (1988), Pindell e colaboradores (1988, 1994, 1998) e Iturralde-Vinnent e colaboradores (1994, 1997, 2000).

O trabalho de Ross e Scotese (1988), utilizando modelos computacionais, resultou nos seguintes pontos principais: (i) um ajuste revisado do Pangea; (ii) a abertura do **Golfo do México** no Jurássico Médio a Superior; (iii) a formação do **oceano Protocaribenho** devido à separação entre a América do Norte e do Sul no Cretáceo Inferior; (iv) a formação do arco das **Antilhas Maiores** ao longo da margem oeste do oceano Protocaribenho; (v) a inserção de parte da **placa de Farallon** entre as Américas do Norte e do Sul durante o Cretáceo Médio, resultando no avanço, para NE, do arco das Antilhas Maiores e na subducção da crosta oceânica do Protocaribe; (vi) a subducção completa do Protocaribe e colisão das Antilhas Maiores com a **Plataforma das Bahamas** no Cretáceo Superior; (vii) o truncamento entre as **placas Caribenha e Pacífica** da placa Farallon com o início da formação do **arco do Panamá**, no final o Cretáceo; (viii) o movimento para oeste das placas Norte e Sul Americanas, com relação à Placa Caribenha, resultando na abertura da **Bacia do Yucatan** no Paleoceno e, posteriormente, na evolução da **Fossa de Cayman** e da principal **zona transcorrente E-W**, observadas na região do Caribe (Figura 2. 6).

O modelo de Pindell (1988) sustenta que Cuba faria parte de uma “proto América Central” que teria sido empurrada para a atual posição por parte da crosta oceânica do Pacífico, limitada por zonas transformantes, entre as **placas Farallon e Cocos-Nazca**. Este modelo é sustentado por análise paleomagnética da movimentação entre a América do Norte, do Sul e África, magnetismo do assoalho oceânico, altimetria por satélites e análise da geologia do entorno caribenho. Apenas em sua fase mais inicial, Cuba teria sido um arco insular com uma zona de subducção ao sul, parte do sistema colisional entre o Pacífico e as Américas. Ao ser empurrada para a sua posição atual no Caribe, uma nova zona de subducção formou-se ao norte, sendo estabilizada após seu fechamento por colisão com a margem passiva gerada no início da abertura do Atlântico Norte. Nas demais ilhas das **Antilhas Maiores (Espanhola e Porto Rico)** esse processo ocorreu mais tarde. O arco ativo, com subducção para o centro do Caribe, persiste nas **Antilhas Menores**. Toda a movimentação da crosta oceânica do Caribe foi controlada por falhas transformantes, tanto a N-NW (**Yucatan e Golfo do México**), como a S-SE (**Colômbia e Venezuela**). Ao mesmo tempo, todo o processo foi complicado pela presença de ramificações do “rift” Atlântico Norte, que entraram no atual Caribe e contribuíram para a formação de sua crosta.

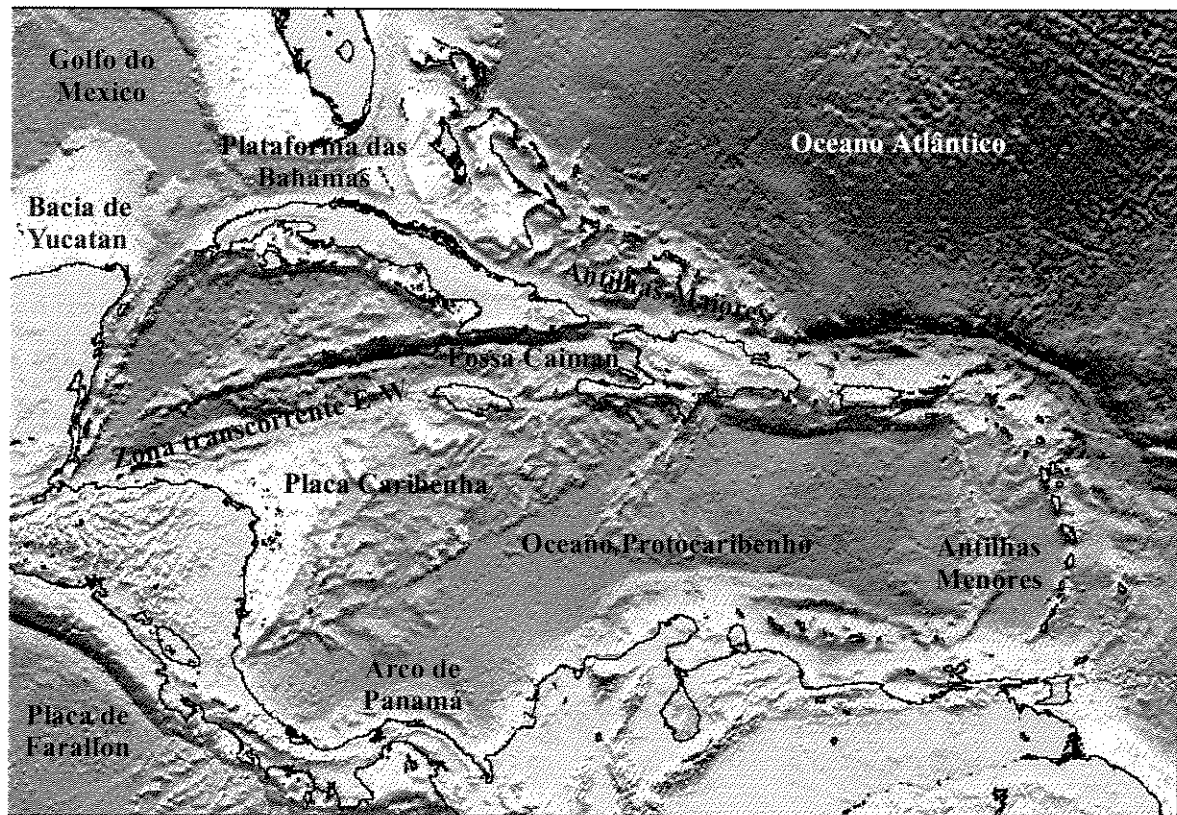


Figura 2. 6. Cuba no contexto do Caribe (modificado de Smith e Sandwell 1999).

Os modelos de Pindell (e.g., 1994) e de Ross e Scotese (1988) quase não fazem referência específica à geologia de Cuba, com exceção de trabalhos antigos ou obsoletos. Entre todos os modelos propostos para a evolução Caribe, somente o de Iturralde-Vinent (e.g., 1997) leva em conta dados geológicos sobre o território cubano. Segundo este autor, os modelos de Pindell (1994) e Ross e Scotese (1988) não conseguem explicar adequadamente uma série de feições observadas em Cuba, o que o levou a propor um modelo alternativo. Iturralde-Vinent (e.g., 1997), em seu modelo, destaca os seguintes pontos principais: (i) o magmatismo de margem continental que a região Caribenha apresenta é reflexo dos estágios iniciais da fragmentação do Pangea, com a formação das primeiras crostas oceânicas do **Golfo do México e Protocaribe**. Durante esta etapa, o Thetis prolongou-se até o Caribe, comunicando-se com o Pacífico; (ii) a crosta Protocaribenha seria representada pelos ofiolitos do norte-nordeste de Cuba e Espanhola, bem como pelos sedimentos do Jurássico ao Eoceno, dobrados junto à margem continental da

América do Norte. Fragmentos da crosta do Pacífico ocorrem na Colômbia, Venezuela, República Dominicana e Porto Rico; (iii) as associações vulcano-plutônicas dos arcos magmáticos reconhecidos no Caribe representam a evolução em, pelo menos quatro etapas, marcadas por fases de interrupção do magmatismo (Albiano inicial, Mastrichtiano e Eoceno Médio). Essas etapas corresponderiam a mudanças na posição e orientação dos eixos dos arcos e das respectivas zonas de subducção. Isto representaria não um único arco, mas pelo menos quatro eventos distintos; (iv) a zona de subducção dos arcos caribenhos, desde o Cretáceo Inferior até o Eoceno Médio, sempre mergulhou do Caribe para suas bordas (a zona de subducção do arco cubano encontra-se ao sul e mergulhando para NE). Somente a partir do Eoceno Superior, a zona de subducção das Antilhas Menores passou a mergulhar do Atlântico para o Caribe.

Um ponto importante, destacado por Amaral (Prof. Gilberto Amaral, com. escrita), é que nenhum deste três principais modelos sobre a evolução do Caribe faz referência à estrutura de impacto Chicxulub, que se formou junto à extremidade norte da Península Yucatan no limite K-T. Esse evento é considerado o principal responsável pela extinção dos dinossauros e foi de enorme magnitude. O programa de perfurações oceânicas profundas (ODP Leg 165 Scientific Party, 1996) mostrou que esse evento desencadeou um intenso magmatismo na Placa Caribenha, com idades entre o Eoceno e o Mioceno. Como resultado, além dos materiais derivados do impacto, o Caribe foi recoberto por derrames e piroclasitos. Ademais, este evento ocasionou profundas alterações climáticas, refletidas no caráter de sedimentação da região. Em Cuba, esses eventos poderiam ter originado o arco Paleogênico, no sudeste do país (região de Sierra Maestra). Seria importante, que os novos modelos de evolução geológica da região do Caribe incorporassem as possíveis implicações deste episódio.

2. 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Ando, J.; Harangi, S. Z.; Székely, B. Y.; Dosztály, L. 1996. Petrología de la asociación ofiolítica de Holguín. In: *Iturralde-Vinent, M.A. 1994. Cuban Ophiolites and Volcanic Arc. Project 364: Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Terranes in the Circum Caribbean Realm*, p. 154-178.

- Capote, C. 1999. *Análise do controle estrutural e metalogénico em Cuba Centro-Oriental, com base em dados integrados*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 222 p.
- Capote, C.; Sánchez, R.; Lledias, P.; Santa Cruz-Pacheco, M.; Escobar, E. 1992. Rasgos Estructurales de los Arcos Volcánicos Cubanos. 13th Geological Conference of Caribbean, Pinar del Rio, Cuba.
- Díaz, O. C.; Furrázola, B. G.; Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Estratigrafía de la zona Remedios. *In: Estudios sobre la Geología e Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p. 221-242.
- Furrázola, B. G. e Gil, G. S. 1997. Notas sobre la estratigrafía de las zonas Placetas y Camajuaní en Cuba Central. *In: Estudios sobre la Geología e Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p. 215-220.
- Furrázola, B. G.; Judoley, K.; Mijailovskay, M.; Miroliubov, Y.; Novojatsky, I.; Nuñez-Jiménez, A.; Solsona, J. 1964. *Geología de Cuba*. Ed. Consejo Nacional de Universidades. 120 p.
- Iturralde-Vinent, M. A. 1994. Introduction to Cuban Geology and Geophysics. *In: Cuban Ophiolites and Volcanic Arc. Project 364: Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Terrenes in the Circum Caribbean Realm*, Ciudad de la Habana, p. 3-35.
- Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Introducción a la Geología de Cuba. *In: Estudios sobre la Geología de Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p. 35-68.
- Iturralde-Vinent, M. A.; Stanek, K.; Wolf, D.; Thieke, H. U.; Müller, H. 2000. Geology of the Camaguey Region, Central Cuba Evolution of a Collisional margin in the Northern Caribbean. *In: Miller H. e Hervé F. Zeitschrift für Angewandte Geologie (Geoscientific Cooperation with Latin America-31st International Geological Congress, Rio de Janeiro 2000)*, p.267-273.
- Khudoley, K. M. e Meyerhoff, A. A. 1971. Paleogeography and geological history of Greater Antilles. *Geological Society American Members*. 129: 1-199.
- Marí, T. M. 1997. Particularidades de los Granitoides de Ciego de Avila-Camaguey-Las Tunas y consideraciones sobre su posición dentro del Arco de Islas. *In: Estudios sobre la Geología e Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p. 399-416.

- Meschede, M. e Frisch, W. 1998. A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean plate. *Tectonophysics*, **296**: 269-291.
- Pardo, E. M. 1994. Zonación gravimétrica y modelo fisico-geológico conceptual del cinturón doblado cubano. In: *Iturralde-Vinent, M.A. 1994. Cuban Ophiolites and Volcanic Arc. Project 364: Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Terranes in the Circum Caribbean Realm*, Ciudad de la Habana, p. 70-83.
- Pérez, R. M. e Sukar, S. K. 1997. Granitoides del Arco Volcánico Cretácico de la Región Central de Cuba (antigua provincia de Camaguey). In: *Estudios sobre la Geología e Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p. 387-398.
- Pindell, J. L., 1994. Evolution of the Gulf of Mexico and the Caribbean. In: *Donovan, S. K. e Jackson, T. A. ed. Caribbean Geology, An Introduction*, Kingston Jamaica, University of the West Indies Publishing Association, p. 13-40.
- Pindell, J. L.; Cande, S. C.; Pitman III, W. C.; Rowley, D. B.; Dewey, J. F.; Labrecque, J.; Haxby, W. 1988. A plate-kinematic framework for models of Caribbean evolution. *Tectonophysics*, **155**: 121-138.
- Pindell, J. L. e Barret, S. F., 1990. Geology evolution of the Caribbean region: A plate tectonic perspective. In: *Dengo, G. e Case, J. F., The Caribbean Region*, Boulder, Colorado, Geological Society of America, Geology of North America, p. 405-432.
- Piñero, P. E.; Quintana, M. E.; Marí, M. T. 1997. Caracterización Geológica de los depósitos vulcanógeno-sedimentarios de la región de Ciego-Camaguey-Las Tunas. In: *Estudios sobre la Geología e Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p. 345-356.
- Puscharowski, YU. M. (eds.) 1988. *Mapa geológico de la República de Cuba a escala 1:250.000*. Academias de Ciencias de Cuba y la Unión Soviética. 40 p.
- Puscharowski, YU. M.; Mossakosvky, A. A.; Nekrasov, G. E. 1989. *Nota explicativa al mapa geológico de la república de Cuba a escala 1:250.000*. Instituto de Geología, Academia de Ciencias, Moscú.
- Ross, M. I. e Scotese, C. R. 1988. A hierarchical tectonic model of the Gulf of Mexico and Caribbean region. *Tectonofisic*, **155**: 136-168.

- Shein, V. S. 1974. Modelo geológico-geofísico de Cuba y su plataforma. *Resumen de la I Jornada Científico-Técnica de Geología*. La Habana, Cuba.
- Smith, W. H. F. e Sandwell, D. T., 1999. *Bathymetric Map of Caribbean, 1:1 000.000*. University of Texas.
- Somin, M. L. e Millán, G. 1981. *Geología de los complejos metamórficos de Cuba*. Ed. Nauka, Moscú, Rusia.

CAPÍTULO 3. LEVANTAMENTO AEROMAGNÉTICO DE CUBA CENTRO-ORIENTAL.

PROCESSAMENTO E RESULTADOS

3. 1. INTRODUÇÃO

O Arco Vulcânico Cretáceo (AVC) em Cuba Centro-Oriental é a maior expressão geológico-estrutural da evolução de Cuba dentro do contexto do Caribe e de grande interesse pela presença de importantes depósitos minerais. Diversos modelos da evolução tectônica desse arco foram discutidos baseados em estudos paleomagnéticos, sísmicos e litológicos, à luz da tectônica de placas (Pindell *et al.* 1988; Ituralde-Vinent 1994, 1997; Ituralde-Vinent *et al.* 2000; Meschede e Frisch 1998, Meschede *et al.* 2000, Stanek *et al.* 2000). Contudo, ainda persistem questões que precisam de esclarecimento, relacionadas com a polaridade das estruturas vinculadas à subducção-colisão das placas oceânica, do Caribe, e continental, da Plataforma das Bahamas, localização e resposta das rochas pertencentes ao complexo ofiolítico no seu vínculo à zona de sutura e processos de reativação magmática do AVC.

Com o objetivo de dar maior suporte à interpretação regional e estabelecer uma análise tectôno-estrutural em Cuba Centro-Oriental, com base no processamento e interpretação dos dados aeromagnéticos, procura-se neste capítulo: a) estabelecer domínios magnéticos para Cuba Centro-Oriental e relacioná-los às estruturas geológicas da região; b) interpretar lineamentos a partir do realce das fontes magnéticas vinculadas aos diversos eventos tectônicos; c) fornecer um esquema tectônico-estrutural para Cuba Centro-Oriental, relacionando-o às principais estruturas e evolução geológico-tectônica do setor.

3. 2. MATERIAIS E MÉTODOS

3. 2. 1. Materiais

O levantamento aerogeofísico em Cuba Centro-Oriental, na escala de 1:50.000 foi compartimentado em 3 setores para um total de 26.607 km². As linhas de vôo foram realizadas na direção N-S, espaçadas de 500 m, com pontos de amostragem a cada 50 m e as linhas de controle

(amarração) na direção E-W, espaçadas de 5 km. A rede de apoio, etapa final do levantamento aerogeofísico em setores planos, foi construída com base nas linhas de vôo de controle (geralmente E-W) em todo o território nacional. O objetivo da rede foi coadjuvar as informações dos setores levantados em diferentes datas para realizar o nivelamento do campo físico (aeromagnético).

O levantamento foi realizado com uma aeronave AN-2 de fabricação russa. A altura de vôo foi de 60 m, controlada por um radar altímetro, com erro na altura de 5 m e planimétrico de 50 m. A navegação foi controlada através do equipamento aerofotográfico AFAG-17, com pontos de orientação a cada 3,6 km. Para a aquisição dos dados aeromagnéticos foi utilizado um magnetômetro de prótons (YAMP-3) de fabricação russa, com precisão de 0,1 nT e registro digital em fita magnética, capaz de medir a intensidade do campo magnético total. Como variômetro foi utilizado um magnetômetro terrestre (M-33), com precisão de 1 nT.

Os dados obtidos do levantamento passaram por duas etapas de processamento. Na primeira etapa, realizada durante os trabalhos de levantamento aéreo, as medições aeromagnéticas foram controladas com o variômetro, permitindo conhecer as variações do campo geomagnético terrestre em ciclos de 30 s durante o período de vôo.

Na segunda etapa, os dados de campo foram processados digitalmente na antiga URSS. Aos dados magnéticos, foram aplicadas correções para o controle da variação diurna do campo magnético total e a remoção do *International Geomagnetic Reference Field* (IGRF), obtendo-se, como resultado, o campo magnético anômalo, que representa as fontes a serem estudadas pela geofísica aplicada. Finalmente, os resultados obtidos para cada setor levantado foram “amarrados” a partir da rede de apoio. O erro médio quadrático de nivelamento para o campo magnético anômalo foi de 14,87 nT.

Os dados magnéticos foram interpolados mediante “spline” cúbico, resultando num conjunto de mapas de curvas de contorno do campo magnético anômalo (em papel), nas escalas de 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000. Como produto final, foram confeccionados os relatórios técnico-econômicos de cada setor levantado (Liubi e Martinova 1982; Prieto e Brodovoi 1986; Russanov e Prieto 1987).

A base de dados do levantamento aeromagnético em formato digital ASCII (x, y, z), contendo os dados de vôo na escala de 1:50.000 para a área de estudo, foi fornecida pelo Instituto de Geologia e Paleontologia (IGP) de Cuba.

Neste estudo foram utilizados os seguintes materiais:

1- Base de dados aeromagnética em formato ASCII (x, y, z), correspondente ao levantamento aerogeofísico em Cuba Centro-Oriental, na escala de 1:50.000;

2- Mapa Geológico da República de Cuba (Puscharowski 1988), na escala de 1:250 000.

3. 2. 2. Métodos

3. 2. 2. 1. Técnicas de Processamento

➤ Interpolação em malha regular

Para que possam ser apresentados como superfícies, os dados magnéticos necessitam ser ordenados na forma de malhas com pontos equi-espaciaados, sendo interpolados com emprego de diferentes métodos (Hansen 1993; Ribeiro 1993; Stevanato *et al* 1995).

Quatro métodos serão testados neste estudo: curvatura mínima (Briggs 1974; Swain 1976), inverso do quadrado da distância (Kekler 1994), Krigagem (Krige 1966; Cressie 1990) e “spline” (De Boor 1962; Bhattacharyya 1969). Na seleção, será considerado o método que apresente o menor desvio padrão na interpolação dos dados, e simultaneamente, gere resultados comparáveis àqueles obtidos anteriormente por especialistas russos, através do método “spline” cúbico (item 3. 2. 1).

➤ Espectro de Potência

O espectro de energia é uma função de duas variáveis da energia para um relativo número de onda e direção. A partir da expressão proposta por Bhattacharyya (1966), Spector e Grant (1970) consideram o espectro de potência da intensidade do campo magnético anômalo sobre um corpo retangular como equação 1:

$$r = \sqrt{(u^2 + v^2)} \quad \text{número de onda}$$
$$\theta = \tan^{-1}(u/v) \quad \text{direção do número de onda}$$

$$E(r, \theta) = |F(\Delta T)|^2 = 4\pi^2 k^2 e^{-2\pi h r} (1 - e^{-\pi r})^2 S^2(r, \theta) R_T^2(\theta) R_x^2(\theta) \quad (1)$$

$$S(r, \theta) = \frac{\sin(ar \cos \theta)}{ar \cos \theta} \cdot \frac{\sin(br \cos \theta)}{br \cos \theta}$$

$$R_T^2(\theta) = [n^2 + (l \cos \theta + m \sin \theta)^2]$$

$$R_x^2(\theta) = [N^2 + (L \cos \theta + M \sin \theta)^2]$$

Onde:

k : momento magnético

h : profundidade até o topo de corpo

a : largura do corpo (direção x)

b : comprimento do corpo (direção y)

t : extensão do corpo (direção z)

l, m, n : co-seno da direção do vetor do campo geomagnético T_0

L, M, N : co-seno da direção do vetor de momento magnético k

A aplicação do método permite determinar a profundidades das fontes magnéticas a partir da declinação da curva do espectro de energia (Spector e Grant, 1970; Bhattacharyya e Kuang, 1977). Esta profundidade é estatisticamente determinada pela seguinte expressão:

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

Onde:

h : profundidade

s : declividade do logaritmo de potência do espectro

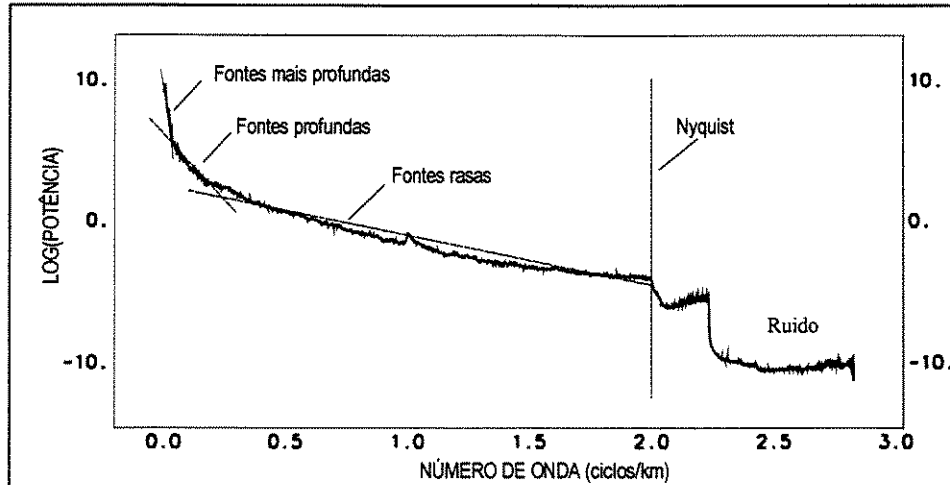


Figura. 3. 1 Espectro de energia (Spector e Grant 1970).

➤ Filtragem de frequências espaciais

(I) Continuação para Cima

Este filtro opera a partir de uma malha de dados gerando outra em um “datum” situado a uma distância qualquer do plano de observação. O objetivo é basicamente reduzir os efeitos de fontes superficiais e ruídos produzidos por altas frequências, mostrando a influência de fontes profundas, incluindo informações regionais (Peters 1949; Trejo 1954; Dean 1954; Nettleton e Cannon 1962; Jacobsen 1987; Pawlosky 1995).

(II) Derivada Horizontal

Este filtro de alta frequência, aplicado na direção “x” ou “y”, permite mostrar a tendência das principais estruturas ao realçar os gradientes das possíveis fontes anômalas (Stanley 1977; Atchuta *et al.* 1980; Mc Graht 1991).

(III) Derivada Vertical

Filtro que amplifica os comprimentos de onda curtos, acentuando os gradientes das bordas dos corpos magnéticos rasos (Peters 1949; Elkins 1951; Bhattacharyya 1976; Gupta e Ramani 1982).

(IV) Pseudogravidade.

Tem como princípio teórico a relação descoberta por Poisson entre a densidade e a magnetização. Como o potencial gravimétrico é um potencial Newtoniano (U), sua relação com o potencial magnético (V) pode ser definida como:

$$\vec{\mathfrak{S}} \cdot \vec{\text{grad}} U = f\sigma \cdot V$$

Onde:

$\vec{\mathfrak{S}}$: magnetização

$$f = 66.7 \cdot 10^{-9} u \cdot CGS$$

σ : densidade

Baranov (1957), define o método de anomalias pseudogravimétricas como a transformação de anomalias provocadas pela intensidade do campo magnético (bipolar) em anomalias magnéticas, só que computadas em relação a uma componente vertical de magnetização. As anomalias pseudogravimétricas podem ser calculadas segundo a seguinte equação:

$$g(0) = -\frac{1}{2\pi} \iint_{\kappa} T(\rho, \omega) \Omega_2(\omega) d\rho \cdot d\omega$$

Onde:

$$\Omega_2(\omega) = \frac{(\lambda^2 - \mu^2) + \lambda^3 \cos \omega}{(1 + \lambda \cos \omega)^2}$$

T : campo total da anomalia

I : inclinação do campo normal

$$\mu = \text{sen } I$$

$$\lambda = \text{cos } I$$

ρ, ω : coordenadas polares.

(V) Redução ao Pólo

Assumindo as anomalias magnéticas causadas por indução e remanescência, o método de redução ao pólo transforma o campo residual das áreas de observação para a inclinação

geomagnética de 90^0 (Baranov 1964). A redução ao pólo pode ser realizada com base no seguinte operador:

$$L(\theta) = \frac{1}{[\text{sen}(I_a) + i \cos(I) \cdot \cos(D - \theta)]^2}$$

Onde:

I : inclinação do campo geomagnético

I_a : inclinação para correção de amplitude (nunca menor que I)

D : declinação do campo geomagnético

θ : azimute

Com este procedimento é eliminada a assimetria do corpo provocada pelo vetor de indução (inclinação). Considerando que a área de estudo situa-se em uma região de alta latitude geomagnética (52.1^0), torna-se justificável a aplicação deste método.

(VII) Sinal Analítico

O sinal analítico (amplitude e fase) é uma técnica que permite determinar parâmetros geométricos da fonte anômala. Nabighian (1972, 1974, 1984), aplicou pela primeira vez o método para análise 2-D dos corpos em perfis e 3-D em malhas.

A amplitude do sinal analítico em 3-D pode ser definida pela seguinte equação (Nabighian 1984):

$$|A(x, y)| = \sqrt{(G_x)^2 + (G_y)^2 + (G_z)^2}$$

Onde:

G : anomalia de campo potencial

$G_x = \partial G / \partial x$ (derivada parcial horizontal em x)

$G_y = \partial G / \partial y$ (derivada parcial horizontal em y)

$G_z = \partial G / \partial z$ (derivada parcial vertical)

A posição do máximo sinal analítico determina o contorno da fonte anômala. Assumindo que as anomalias são causadas por contatos verticais, o sinal analítico permite determinar a profundidade dos corpos ao considerar estas como a metade da largura da amplitude do sinal, permitindo assim a determinação das características (geometria e profundidade) das fontes (Bakley e Simpson 1986).

A principal vantagem da interpretação do sinal analítico em 3-D consiste na determinação das características da fonte anômala (i.e., mostra as bordas do corpo), sem a influência dos parâmetros do campo magnético terrestre e da direção de magnetização da fonte (Roest *et al.* 1992). A aplicação deste método é de grande utilidade em áreas onde é desconhecida a contribuição da magnetização remanescente das fontes anômalas.

Hsu *et al.* (1996), visando uma melhor forma de definir as fontes anômalas rasas sugere o uso do sinal analítico obtido da segunda derivada. A amplitude do sinal pode ser determinada pela seguinte equação:

$$|A_2(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} G_x\right)^2 + \left(\frac{\partial^2}{\partial y^2} G_y\right)^2 + \left(\frac{\partial^2}{\partial z^2} G_z\right)^2}$$

A fase do sinal analítico é uma extensão da teoria proposta por Nabighian (1984). Thurston e Smith (1997), demonstram que a fase permite a estimativa do mergulho e o contraste da susceptibilidade das fontes causadoras das anomalias.

A fase do sinal analítico pode ser definida como:

$$\Phi_n(x, y) = \arctan\left(\frac{\left(\frac{\partial G_z^n}{\partial z}\right)}{\sqrt{\left(\frac{\partial G_z^n}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial G_z^n}{\partial y}\right)^2}}\right)$$

Onde:

n: ordem da derivada

(VIII) Susceptibilidade magnética aparente

O filtro de susceptibilidade é, de fato, a composição dos filtros de redução ao pólo e continuação para baixo até a profundidade escolhida da fonte (Jones 1986).

O método leva em consideração que do campo magnético deve ser removido o *IGRF*; não considera a magnetização remanescente e as respostas magnéticas obtidas são causadas por

prismas verticais de base quadrada com comprimento infinito (Bhattacharyya 1966). O filtro opera segundo a seguinte equação:

$$L(k, \theta) = \frac{1}{2\pi F \cdot H(r) \cdot \Gamma(\theta) \cdot K(r, \theta)}$$

Sendo:

$$H(r) = e^{-hr}$$

$$\Gamma(\theta) = \text{sen } I_a + i \cos I \cdot \cos(D - \theta)$$

$$K(r, \theta) = \left(\frac{\text{sen}(\text{arco } \cos \theta)}{\text{arco } \cos \theta} \right)^2$$

Onde:

$H(r)$: continuação para baixo até h

r : número de onda

$\Gamma(\theta)$: redução ao pólo

$K(r, \theta)$: fator geométrico do prisma vertical (dimensão ∞)

I : inclinação do campo magnético

I_a : amplitude da inclinação da redução ao pólo

D : declinação do campo magnético

F : campo magnético total

h : profundidade em metros relativa ao nível de observação para o qual será calculada a susceptibilidade.

Este filtro vem sendo aplicado com sucesso na confecção de mapas de susceptibilidade magnética (Jones 1986; Clows 1986; Prieto *et al.* 1998b; Blum 1999).

3. 2. 2. 2. Técnicas de Interpretação

A interpretação teve como objetivo, numa primeira etapa, selecionar domínios a partir das intensidades das diferentes unidades magnéticas e relacioná-los às estruturas geológicas presentes na área (Prieto *et al.* 1997, 1998a, 1999). Em seguida, procedeu-se à integração das respostas dos produtos magnéticos com o modelo geológico-tectônico do setor, para obter-se os esquemas de lineamentos e magneto-estrutural.

3. 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

De forma geral, a magnetometria tem um importante papel no mapeamento geológico-estrutural da área, pelo amplo espectro de valores do campo magnético anômalo, ao apresentar notáveis contrastes entre as rochas magmáticas (vulcano-plutônicas) que transicionam de composição básica até ácidas, com as formações sedimentares.

3. 3. 1. Resultados

3. 3. 1. 1. Interpolação em malha regular

Na escolha do método interpolador para os dados aeromagnéticos, testando os quatro métodos descritos no item 3. 2. 2. 1, foi selecionada uma área menor que a área de estudo. Na Tabela 3. 1 são mostrados os resultados estatísticos dos dados originais e dos gerados após o processo de interpolação realizado nos programas *SurferTM for Windows 4.3* e *Geosoft Inc. (Oásis MontajTM)*. De forma geral, todos os métodos ofereceram bons resultados, entretanto o método de Krigagem com variograma linear foi considerado o mais adequado por apresentar o menor desvio padrão dos dados e resultados similares aos obtidos com “spline” cúbico (item 3. 1. 2). Considerando a escala do levantamento 1:50.000, com espaçamento entre linhas de vôo de 500 m e pontos de amostragem a cada 50 m, a malha resultante foi calculada com célula de 250 m.

Tabela. 3. 1 - Estatística dos dados aeromagnéticos originais e interpolados.

Método	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio Padrão
Dados originais	-1584	3274	77	270
Inverso do quadrado da distância	-1530	3021	72	270
Curvatura Mínima	-1469	3034	76	267
Krigagem	-1385	2924	83	264
“Spline”	-1553	3027	75	269

3. 3. 1. 2. Campo magnético anômalo

Após a seleção do método de interpolação, obteve-se a imagem do campo magnético anômalo (Figura 3. 2), a qual serviu de base para aplicação de diversas técnicas de processamento realizadas com emprego do programa *Geosoft Inc. (Oásis MontajTM)*.

➤ Espectro de Potência

O espectro de energia da área de estudo é representado na Figura 3. 3. Este apresenta três partes distintas da esquerda para a direita. A primeira (1), representa as fontes infracrustais com profundidades de até 10 km, relacionadas aos maiores comprimentos de onda ($\sim 0,08$ rad/km). A segunda (2), reflete as fontes intracrustais de comprimentos de ondas intermediários ($\sim 0,08$ - $0,2$ rad/km), com profundidades em torno de 2 km. A terceira (3), representa as fontes supracrustais com os menores comprimentos de onda ($> 0,2$ rad/km) e profundidade média de 500 m (já descontados os 60 m da altura média de vôo do levantamento). Além do comprimento de onda 2.0 rad/km (Nyquist), apresenta-se no levantamento o fenômeno de *aliasing*.

A estimativa das profundidades das fontes magnéticas obtidas a partir dos resultados mostrados pelo espectro de potência serve, conseqüentemente, para definição dos filtros a serem aplicados ao campo magnético anômalo.

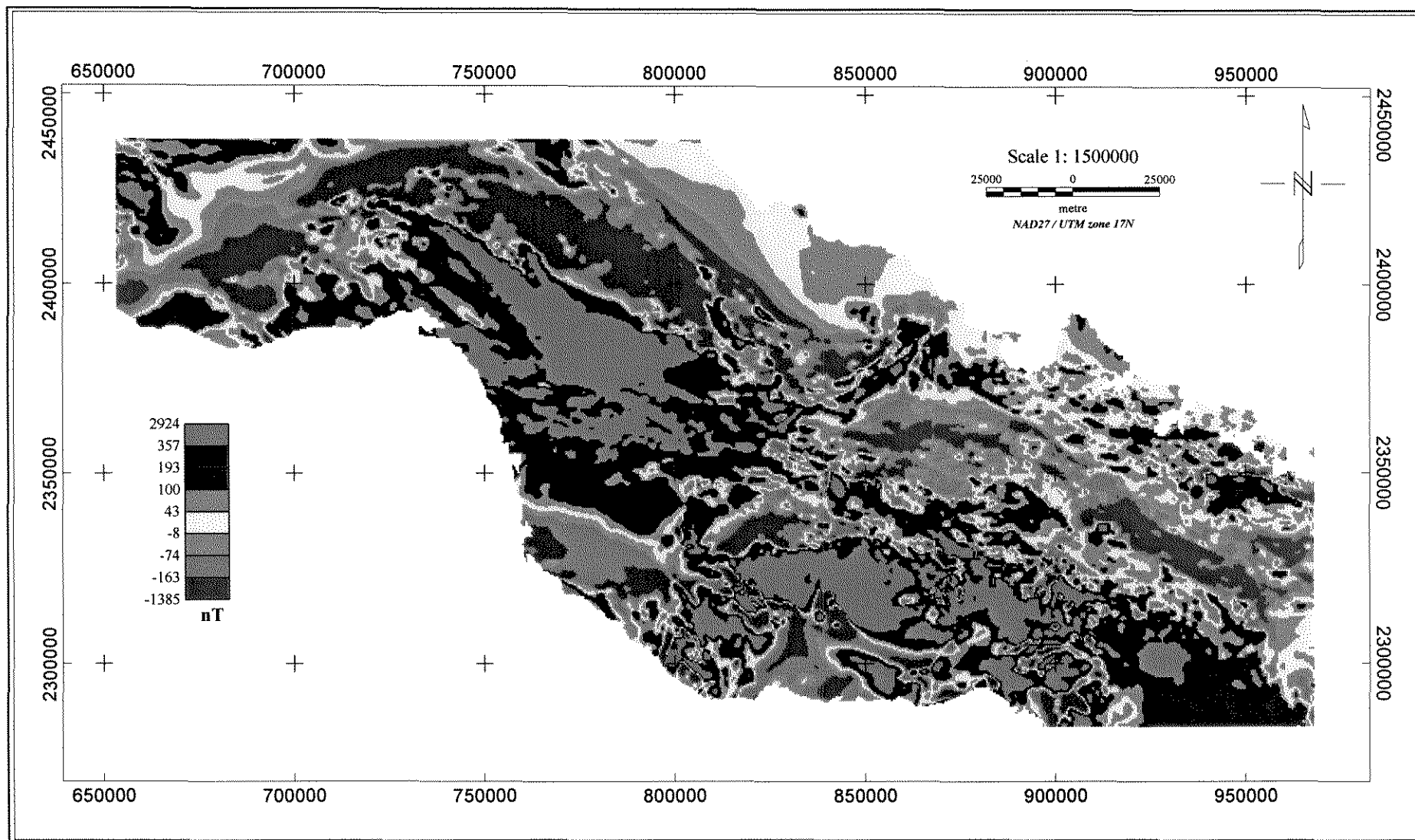


Figura 3. 2. Mapa do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

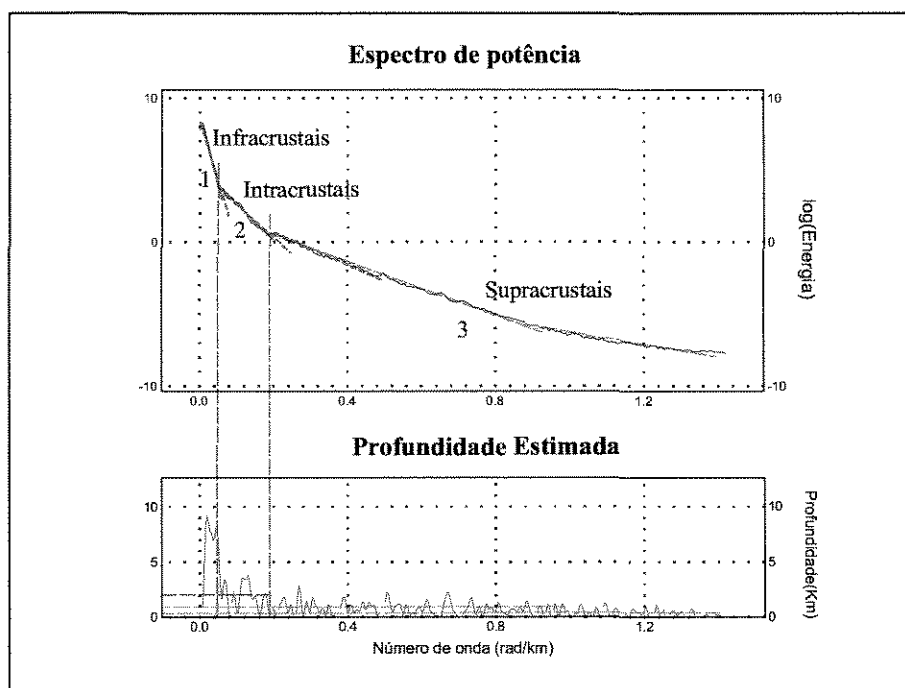


Figura. 3. 3. Espectro de potência de campo magnético anômalo.

➤ Filtros aplicados

Os filtros selecionados de acordo com seus resultados foram agrupados entre aqueles que permitem separar as anomalias magnéticas a partir da intensidade do campo (redução ao pólo, continuação para cima, susceptibilidade magnética e pseudogravidade), dos que realçam as fontes magnéticas (amplitude e fase do sinal analítico e derivadas horizontais e vertical).

(I) Redução ao pólo, continuação para cima, susceptibilidade magnética e pseudo-gravidade.

A Figura 3. 4, mostra o campo magnético anômalo reduzido ao pólo, com valores entre -2984 nT e 3258 nT. Ao longo da porção N-NE da área de estudo, observa-se o campo magnético com baixa intensidade e valores intermédios entre -171 nT e 143 nT. No centro, observa-se um intenso campo de valores positivos (> 143 nT) e forte gradiente, cujo eixo central tem azimute de 135° . Dentro do contexto deste campo, destacam-se setores de variada extensão e intensidades maiores que 400 nT.

O campo magnético de valores negativos também é complexo e com intensidade variável (até > -2000 nT). Na porção norte da área, o campo apresenta-se alongado na direção NW-SE e com intenso gradiente. Nos setores oeste e sul, o campo de valores negativos apresenta quase ausência de gradientes, mudando sua simetria.

As continuações para cima foram calculadas até 2000 m e 10000 m, respectivamente (Figuras 3. 5 e 3. 6), considerando as profundidades das camadas rochosas obtidas no espectro de potência. Observa-se, na porção N-NE da área, baixa intensidade e gradiente do campo magnético, variando entre -90 nT e 60 nT. Na porção central, o campo apresenta valores elevados (>100 nT) de direção NW-SE, destacando-se intensas anomalias (> 200 nT) de variada simetria. Na porção centro-sul da área, observa-se claramente uma faixa alongada de valores negativos (< -300 nT) de direção NW-SE e SW-NE.

A imagem da susceptibilidade magnética (Figura 3. 7) foi calculada para uma profundidade de 2000 m, que representa, aproximadamente, a média das profundidades das fontes magnéticas supracrustais (Figura 3. 3). Os resultados obtidos não diferem dos anteriores quanto às características do campo, mas fornecem, quantitativamente, os contrastes dos complexos rochosos com alta susceptibilidade ao longo da porção central da área.

A Figura 3. 8 mostra a imagem de pseudogravidade, a qual deve ser considerada como um mapa magnético transformado, cujos resultados são similares aos obtidos numa transformação de *Bouguer*. Destaca-se na porção central da área, uma ampla faixa de valores positivos intensos, com direção NW-SE.

(II) Derivadas horizontais, vertical, amplitude e fase do sinal analítico.

As imagens correspondentes às derivadas horizontais (Figuras 3. 9, 3. 10) e vertical (Figura 3. 11), mostram resultados satisfatórios ao realçar os gradientes das fontes anômalas, relacionados com as tendências principais das estruturas no setor. Destaca-se em toda a porção central da área, desde o leste até o oeste, *trends* com fortes gradientes de direção principalmente NW-SE, cortadas por outros com tendência NE-SW, de maior magnitude, os quais afetam a simetria dos primeiros e praticamente dividem a área de estudo em dois grandes blocos, leste e oeste. Observa-se também na imagem correspondente ao mapa de derivada vertical (Figura 3. 11) gradientes de direção N-S, mas em menor frequência e magnitude que os anteriormente descritos.

A amplitude do sinal analítico (Figura 3. 12), mostra a distribuição, posicionamento e contorno das fontes magnéticas na área de estudo. Observa-se a ampla distribuição de fontes magnéticas de variada geometria em quase todo o setor, posicionadas principalmente na porção central e sul.

A fase do sinal analítico (Figura 3. 13) representa o mergulho do gradiente das fontes anômalas. No setor, apresentam uma forte tendência do gradiente em direção NW-SE e mergulho quase de 90° .

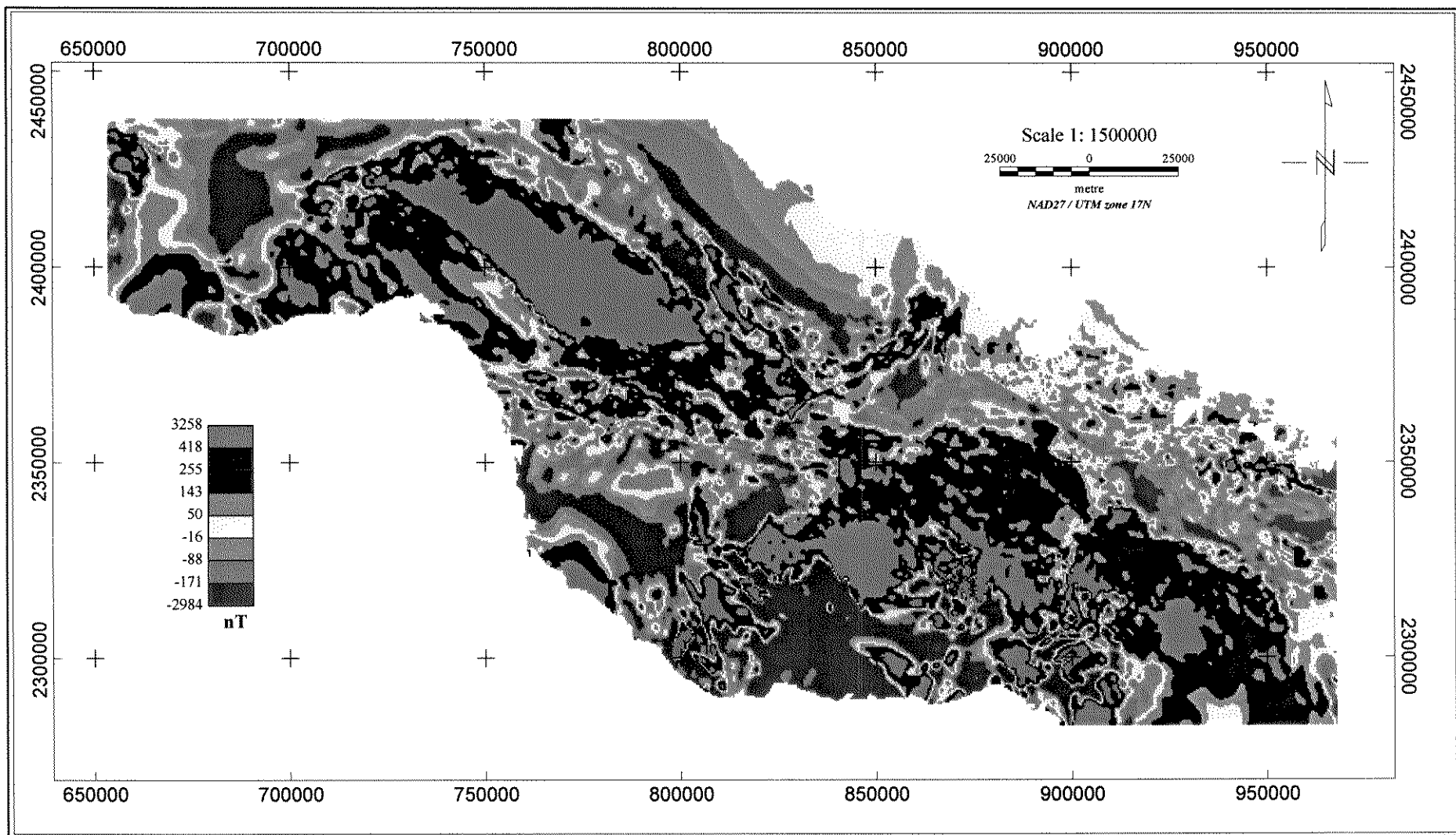


Figura 3. 4. Mapa de redução ao pólo do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

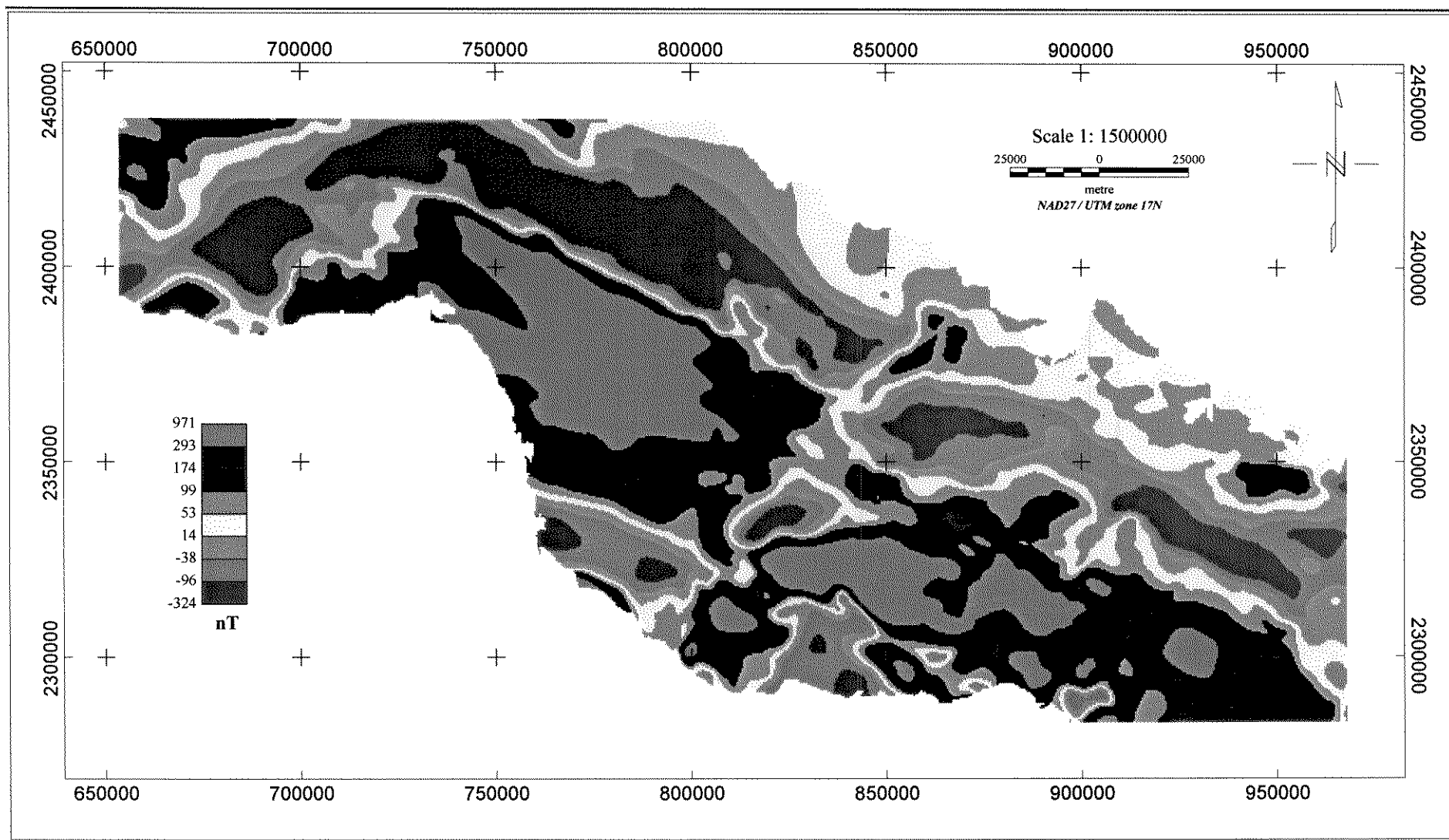


Figura 3. 5. Mapa de continuação para cima (2000 m) do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

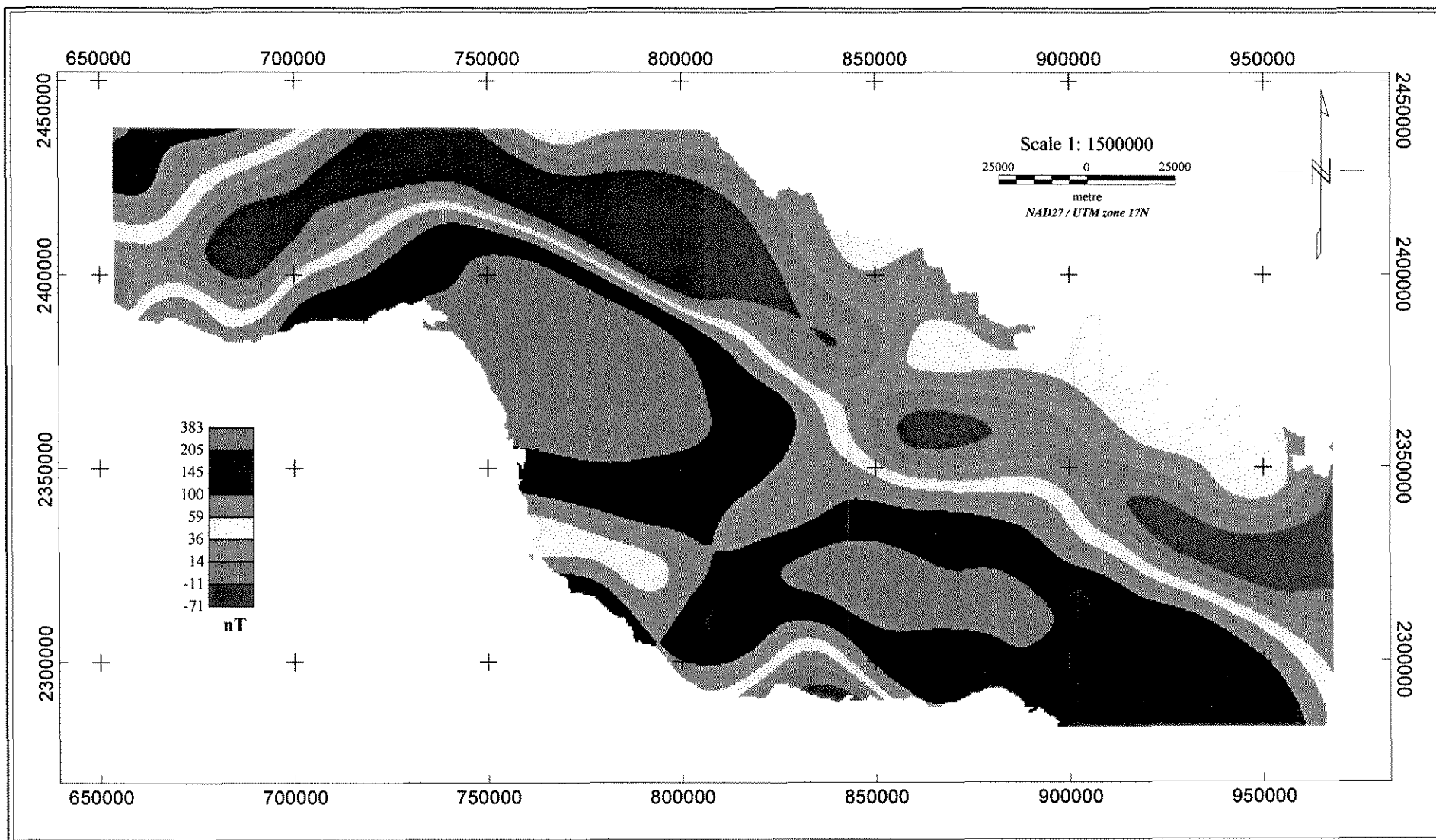


Figura 3. 6. Mapa de continuação para cima (10 000 m) do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

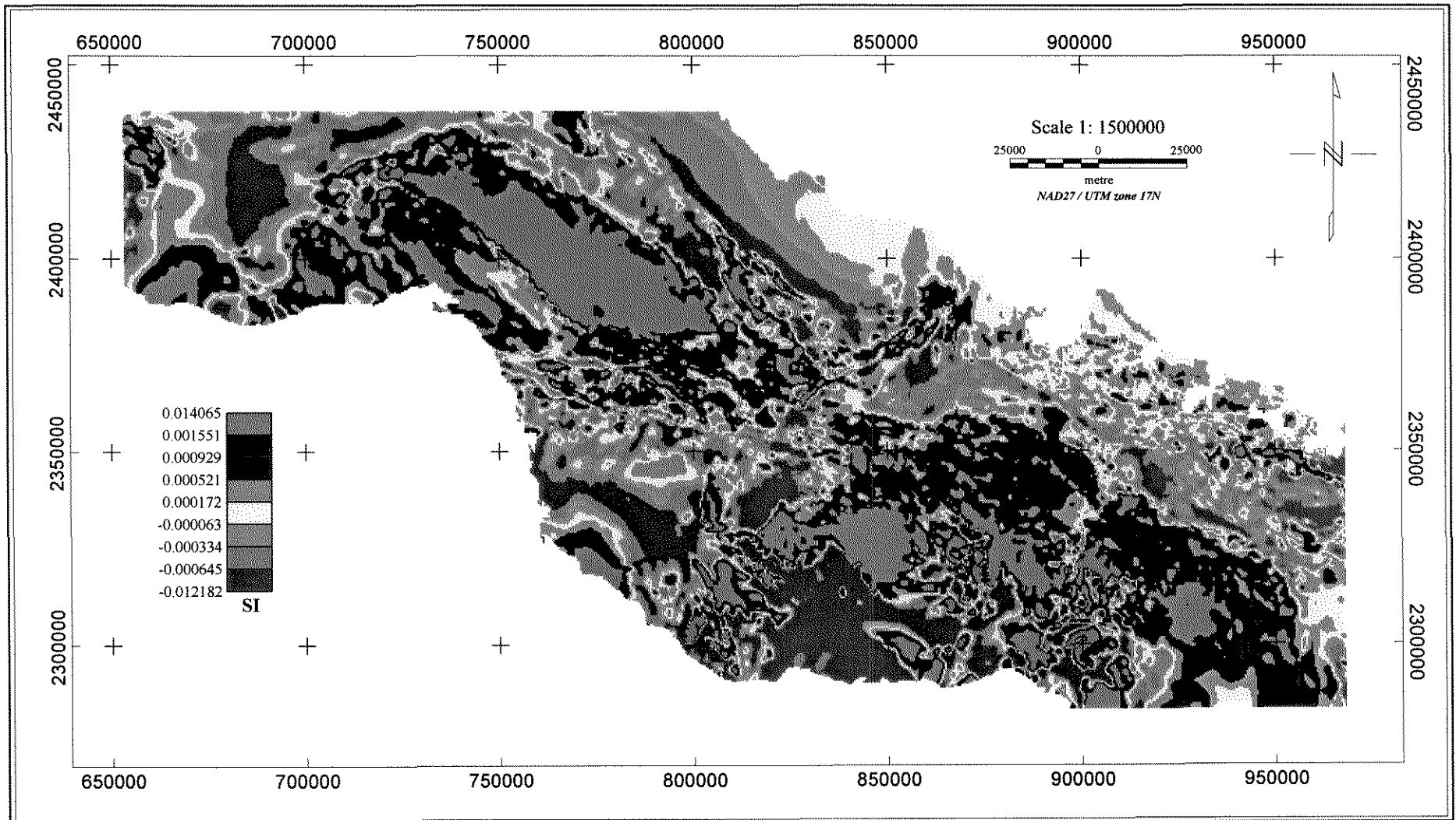


Figura 3. 7. Mapa de susceptibilidade magnética do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

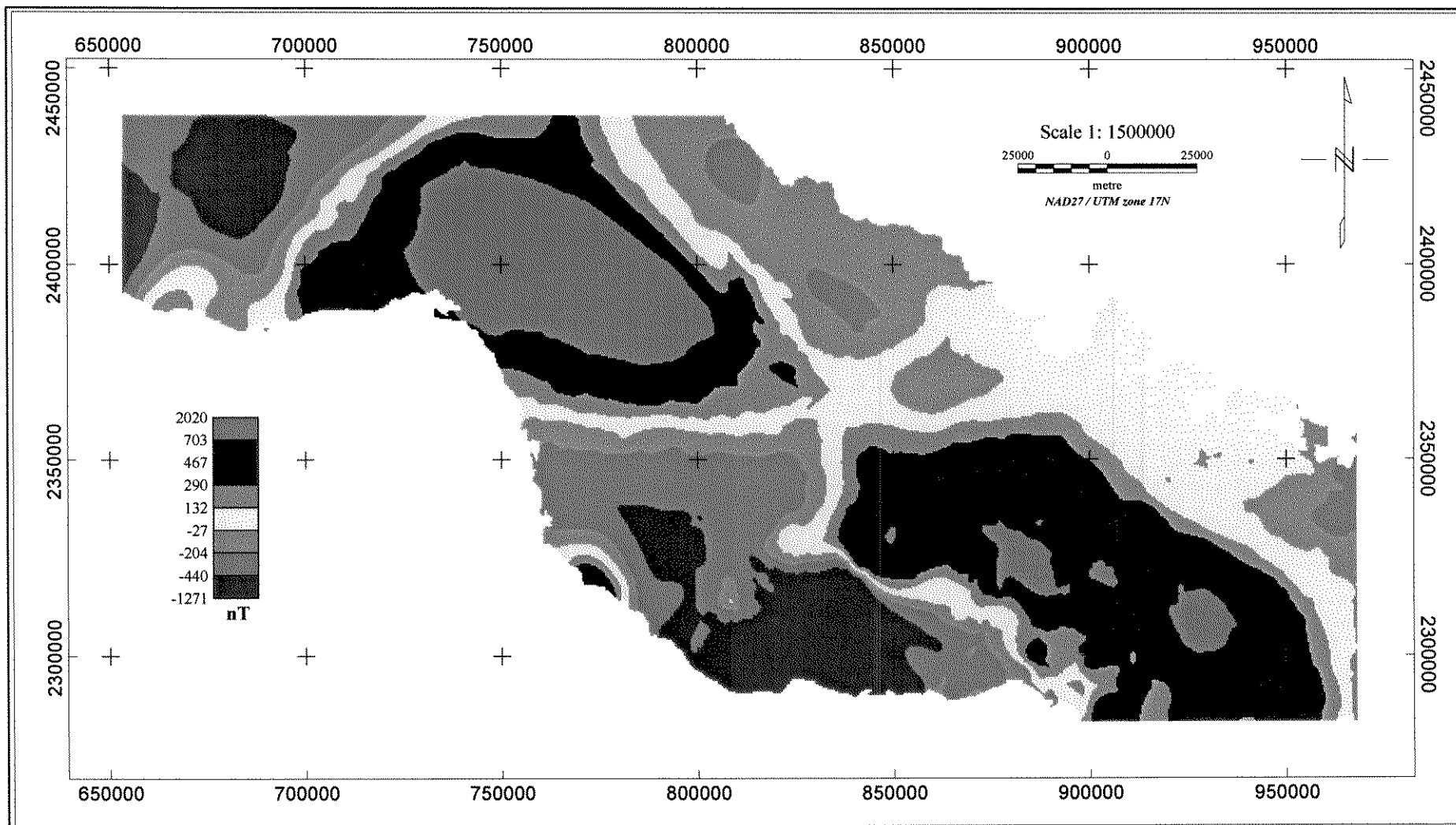


Figura 3. 8. Mapa de pseudogravidade do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

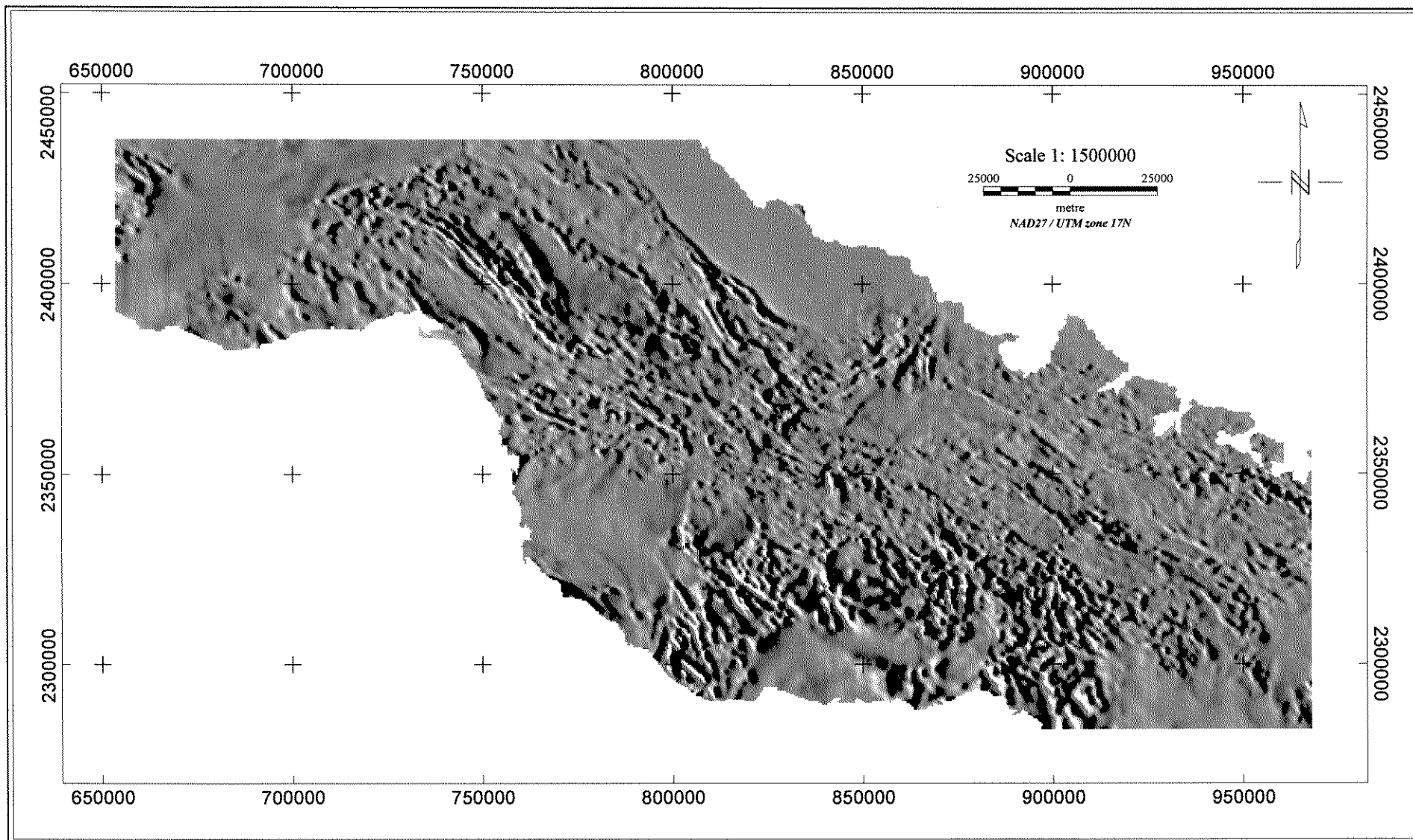


Figura 3. 9. Mapa de derivada horizontal em X do campo magnético anômalo (sombreamento sintético 45), Cuba Centro-Oriental.

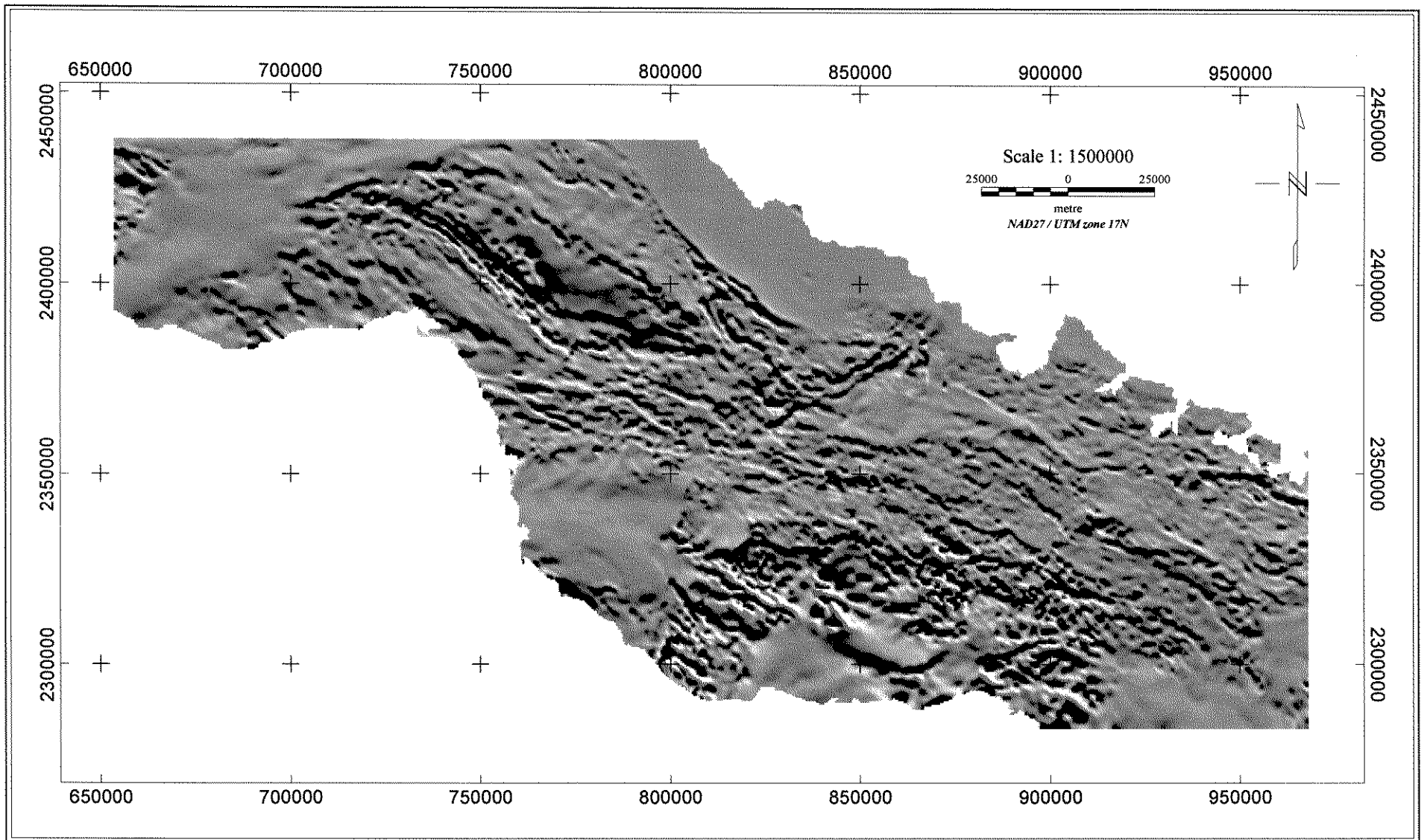


Figura 3. 10. Mapa de derivada horizontal em Y do campo magnético anômalo (sombreamento sintético 45), Cuba Centro-Oriental.

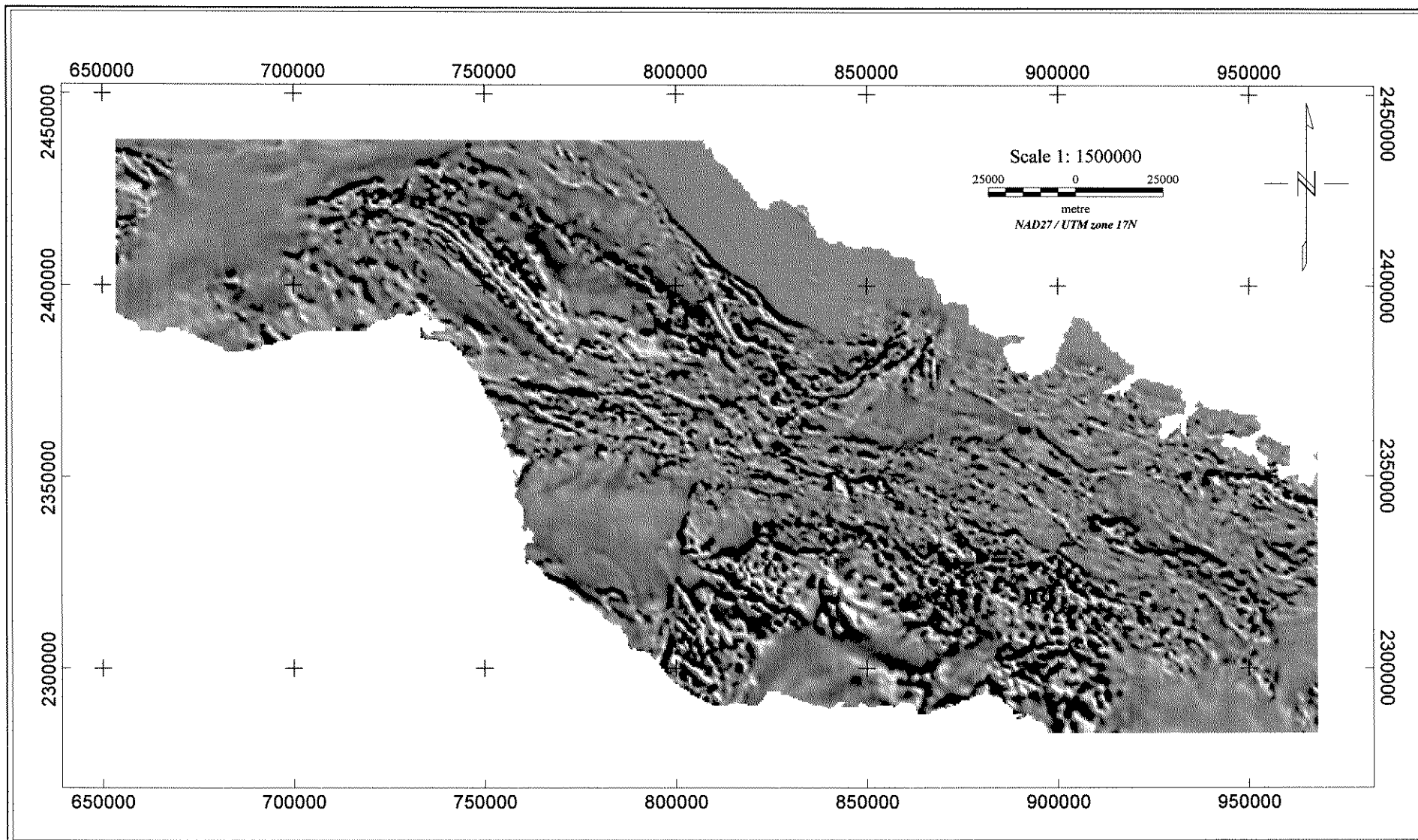


Figura 3. 11. Mapa de derivada vertical do campo magnético anômalo (sombreamento sintético 45), Cuba Centro-Oriental.

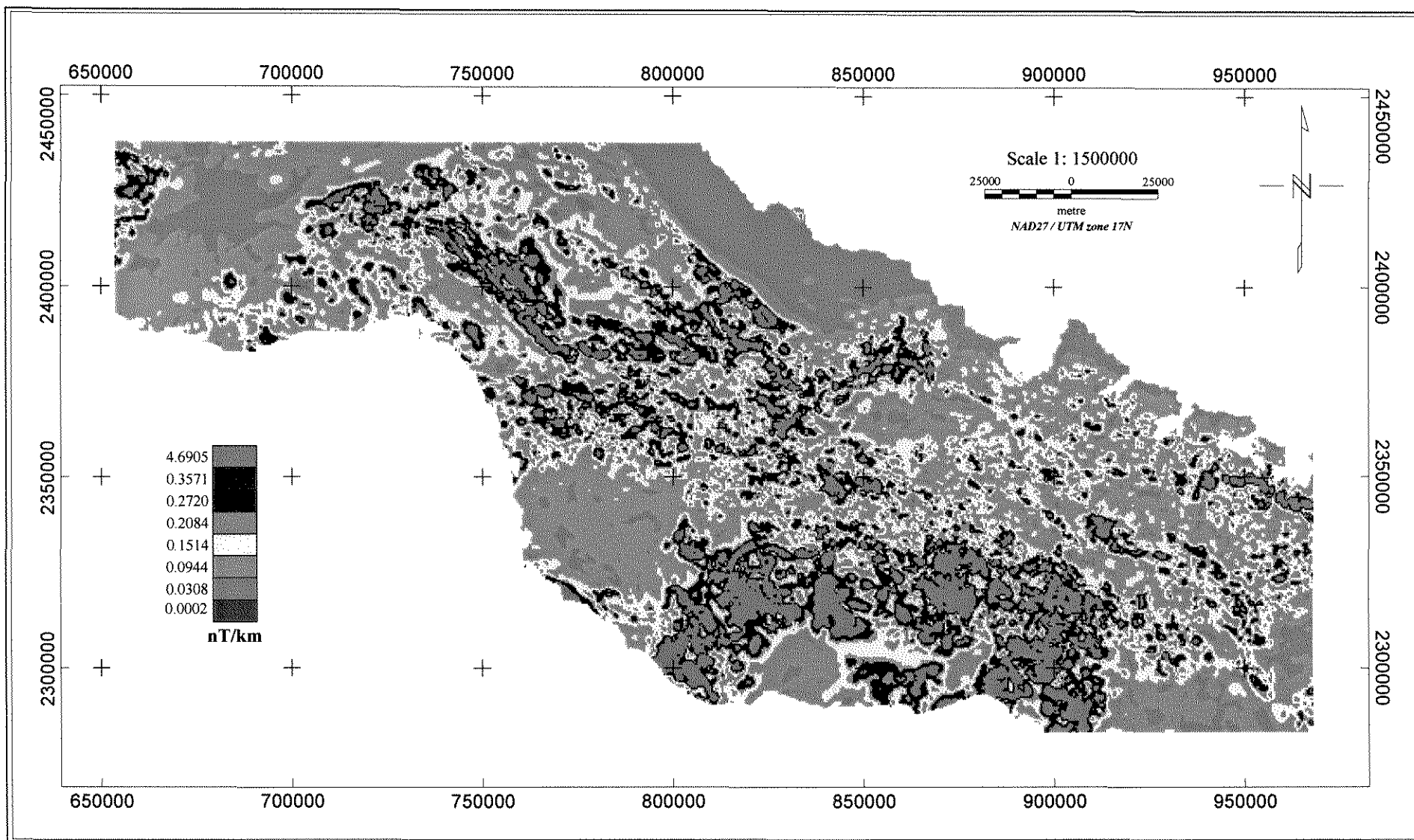


Figura 3. 12. Mapa de amplitude de sinal analítico do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

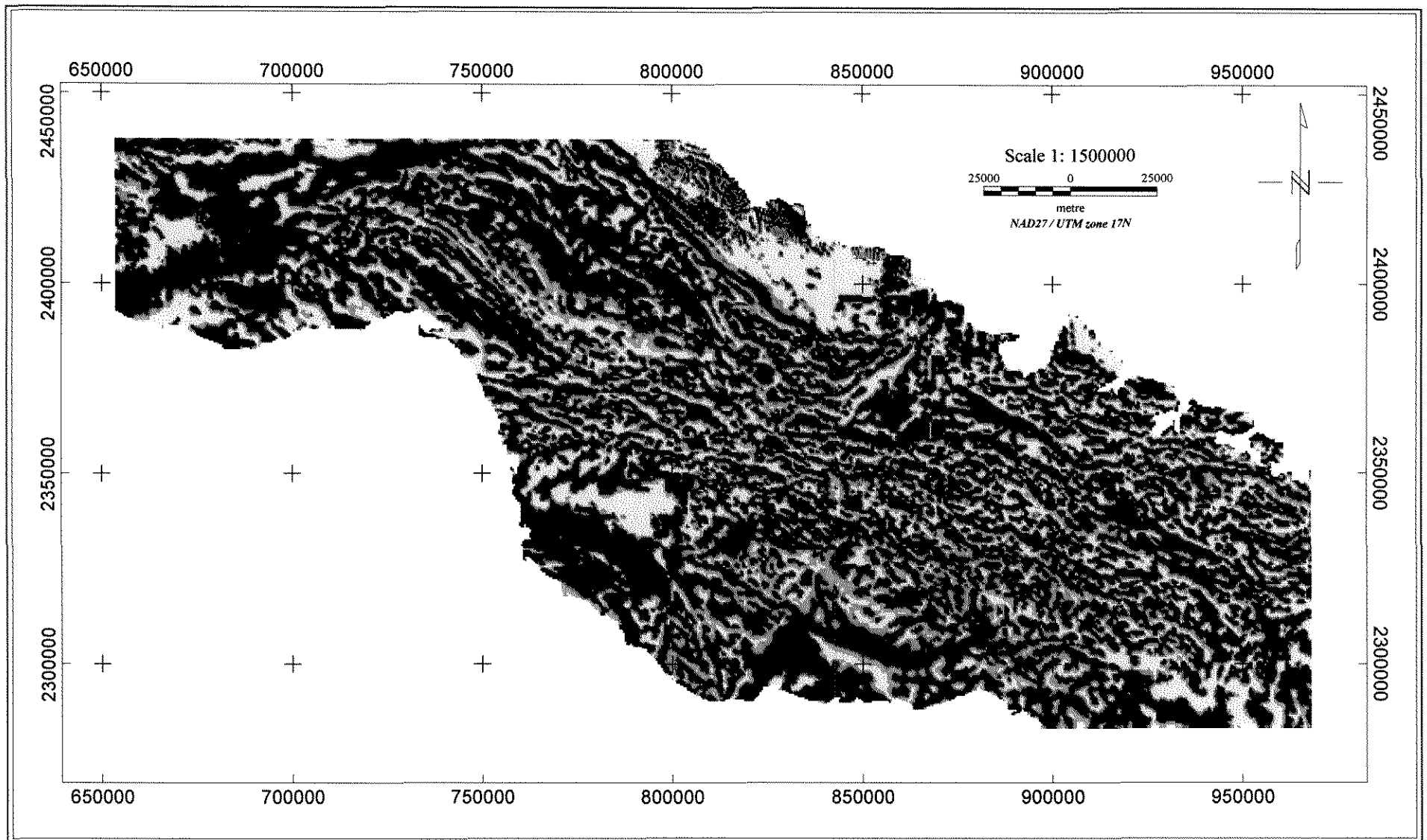


Figura 3. 13. Mapa de fase de sinal analítico do campo magnético anômalo (sombreamento sintético 45), Cuba Centro-Oriental.

3. 3. 2. Discussões

3. 3. 2. 1. Interpretação do campo magnético anômalo

O processamento dos dados do campo magnético anômalo gerou resultados que indicam um quadro geofísico complexo para a área de estudo. A interpretação e integração destes dados permitiram a confecção do mapa de domínios magnéticos e os esquemas de lineamentos e magneto-estrutural da área de estudo.

(I) Mapa de domínios magnéticos

Na elaboração do mapa de domínios magnéticos foram selecionados e integrados os produtos capazes de descrever as características do campo a partir das suas intensidades. O emprego do mapa de campo magnético anômalo reduzido ao pólo (Figura 3. 4), continuação para cima (Figuras 3. 5; 3. 6) e amplitude do sinal analítico (Figura 3. 12), mostraram-se eficazes na seleção dos domínios. Os mapas de susceptibilidade magnética (Figura 3. 7) e pseudo-gravidade (Figura 3. 8), tiveram menor peso na seleção.

Na Figura 3. 14, foram definidos 4 domínios:

Domínio A: encontra-se nas porções central e centro-sul do setor. Apresenta um campo de valores positivos, localmente intensos, com amplitude maior de 3000 nT (Figura 3. 4), variado comprimento de onda (Figura 3. 12) e altas susceptibilidade e densidade (Figuras 3. 7; 3. 8). Estas anomalias são resultado de fontes magnéticas de diversas profundidades (Figuras 3. 5; 3. 6), destacando-se as relacionadas à prováveis corpos magmáticos-plutônicos (A-1) de composição intermediária-básica do AVC (Marí 1997).

Domínio B: mostra um campo de valores positivos variáveis, com amplitudes entre 50-400 nT (Figura 3. 4). Como pode ser observado nas Figuras 3. 5 e 3. 6, as fontes anômalas são extensas, profundas e limitadas por zonas transversais de direção NE-SW, sendo caracterizadas por susceptibilidade magnética variável (Figura 3. 7) e ampla distribuição e frequência de fontes magnéticas de alto comprimento de onda (Figura 3. 12). Neste domínio, a faixa central (B-1) pode ser relacionada às rochas vulcão-sedimentares de composição básica até ácida, que constituem a borda setentrional da bacia axial do arco (Pardo 1994; Piñero *et al.* 1997), em contato com blocos de serpentinitos do complexo ofiolítico (ver item 2. 2. 2). Os serpentinitos aparecem em janelas tectônicas e são os responsáveis pelos intensos valores do campo magnético

anômalo nesta faixa (ver Figura 2. 3). Situação similar foi descrita por Feinberg *et al.* 1999, nos ofiolitos do sudeste de Oman, onde os processos de obducção e compressão dos ofiolitos no arco, provocaram condições favoráveis para o incremento da serpentinização, com conseqüente remagnetização e aumento das anomalias magnéticas locais. A faixa localizada principalmente nas porções oeste (**B-2**) e sudeste (**B-3**) do setor relacionam-se à corpos sub-vulcânicos, lavas e tufos de composição variada, pertencente à bacia axial do arco (ver item 2. 2. 2).

Domínio C: apresenta um campo magnético de baixa intensidade, com amplitudes entre -90 nT e 50 nT (Figuras 3. 4; 5; 6) e baixa susceptibilidade (Figura 3. 7). Na borda setentrional do setor, este domínio apresenta ausência de fontes magnéticas (Figura 3. 12), podendo estar relacionado às seqüências terrígeno-carbonáticas e sedimentos plataformais com espessuras de até 2000 m (**C-1**), pertencentes à borda setentrional do cinturão dobrado (Pardo 1994), também chamada de Zona Remédios (Díaz *et al.* 1997). As outras áreas podem ser relacionadas principalmente às seqüências efusivo-sedimentares (**C-2**), do arco (Piñero *et al.* 1997).

Domínio D: mostra um campo magnético anômalo de valores negativos, localmente intensos, com amplitudes entre -2900 nT e -90 nT (Figura 3. 4). A faixa setentrional do domínio de direção NW-SE se apresenta com suscetibilidades magnéticas variáveis, de baixa intensidade (Figura 3. 7). Entretanto, em profundidade (Figuras 3. 5; 3. 6), o campo se apresenta com intensidades negativas e amplitudes entre -300 nT e -40 nT. Esta faixa pode ser correlacionada à zona de colisão e distensão entre as crostas oceânicas do AVC e continental da Plataforma das Bahamas (**D-1**), também chamada de sutura marginal (Iturralde-Vinent 1997) e caracterizada por falhas profundas de direção NW-SE, onde aparecem fragmentos do complexo ofiolítico (mélange) (ver item 2. 2. 2). Segundo Lufriú *et al.* (1996); Padilla *et al.* (1996) e Prieto *et al.* (1999) esta região, caracterizada por mínimos alongados com amplitudes de até -500 nT de campo magnético, é marcada pela perda das propriedades magnéticas nas rochas do arco, provocada pelo intenso falhamento ocorrido durante a colisão. As outras áreas a oeste (**D-2**) e sul (**D-3**), têm respostas similares do campo, com anomalias também de valores negativos, sugerindo a presença de espessamento crustal associado a bacias com até 10 000 m de sedimentos do AVC (Iturralde-Vinent 1997).

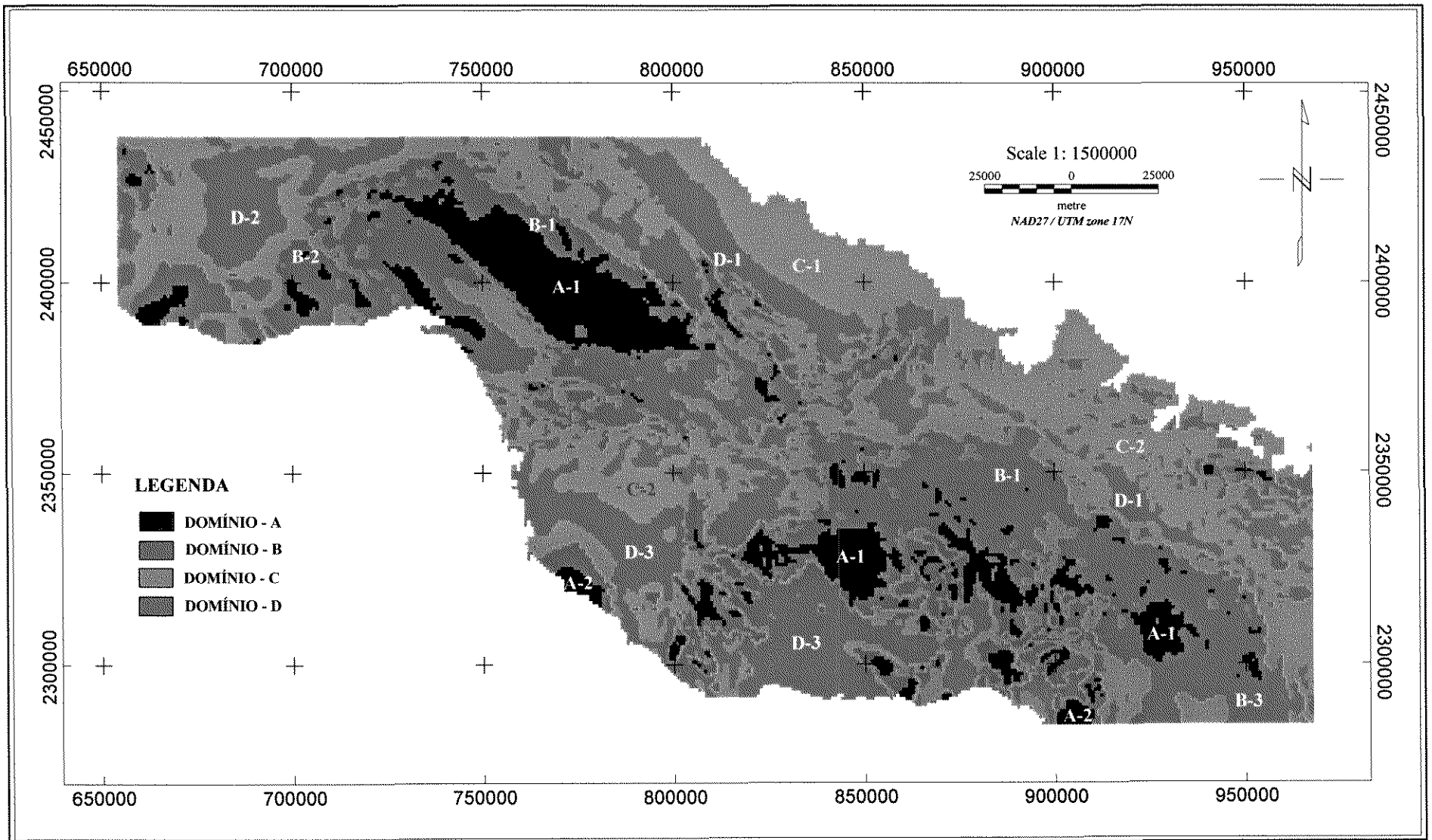


Figura 3. 14. Mapa de domínios magnéticos do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

(II) Esquemas de lineamentos e magneto-estrutural

Os mapas de derivadas horizontais (Figuras 3. 9; 3. 10), derivada vertical (3. 11) e fase do sinal analítico (Figura 3. 13) caracterizam o padrão estrutural do setor, e foram empregados na confecção do esquema de lineamentos. Já na confecção do esquema magneto-estrutural, foram integrados o mapa de domínios (Figura 3. 14) com o esquema de lineamentos, permitindo caracterizar domínios estruturais e relacioná-los ao modelo de evolução geológico-tectônico proposto para a área de estudo (ver item 2. 2. 5).

No esquema de lineamentos (Figura 3. 15), foram determinadas as principais direções de lineamentos NW-SE, SW-NE e N-S na área de estudo. Iturralde-Vinent (1997), considera o sistema “Cubano”, de direção NW-SE, o mais antigo, relacionado aos eventos geo-tectônicos ocorridos nas etapas de formação e desenvolvimento do AVC. O sistema “Camaguey” de direção SW-NE, é considerado mais jovem, sendo constituído principalmente por falhas sinistrais (ver item 2. 2. 3).

Capote (1999) aponta que os lineamentos de direção NW-SE, paralelos ao eixo magmático principal (falha “Cubana Axial”, ver item 2. 2. 3), constituíram vias essenciais de circulação das fases mais tardias do magmatismo, sendo reativadas durante o neoaútóctono. Os lineamentos de direção NE, teriam controlado a intrusão de diques tardios de composição granítica e corpos sub-vulcânicos. Os lineamentos de direção N-S, relacionam-se às ocorrências de ouro, mas são de difícil detecção na escala regional.

- Sistema “Cubano” (NW-SE)

O mapa de fase do sinal analítico (Figura 3. 13) mostrou intensos gradientes de fase, permitindo o traçado de grande quantidade de lineamentos nesta direção, caracterizado por baixos comprimentos de onda, o que denota a intensidade da atividade tectônica neste sistema (Figura 3. 15). Os resultados obtidos dos mapas de derivadas (Figuras 3. 9; 3. 10; 3. 11), mostraram também fortes gradientes de grande comprimento de onda (Figura 3. 15). Esses dados corroboram as interpretações de Iturralde-Vinent (1994) para esta ideia, que descreve o sistema “Cubano” relacionados à etapa colisional da crosta oceânica (arco-ofiolitos) com a crosta continental (Plataforma das Bahamas), sendo a maior expressão deste sistema a falha “Cubana Axial”, controladora do AVC.

- Sistema “Camaguey” (NE-SW)

Partindo da análise dos mapas processados (Figuras 3. 9; 3. 10; 3. 11; 3. 13), observam-se, na direção NE-SW, intensos gradientes de grande comprimento de onda, relacionados com lineamentos do sistema “Camaguey” (Figura 3. 15), deslocando e deformando as estruturas do sistema “Cubano”. As maiores expressões deste sistema são as duas amplas zonas tectônicas denominadas “La Trocha” e “Camaguey” (ver item 2. 2. 3).

- Sistema “Banao” (N-S)

O sistema de lineamentos N-S é observado com dificuldade nos mapas processados, possivelmente pelo fato da escala regional do trabalho (1:250.000) e a coincidência da direção destes lineamentos com as linhas de vôo do levantamento aerogeofísico. No entanto, lineamentos de direção N-S ocorrem disseminados pelo setor, e foram cartografados, com maior frequência, na porção leste da área.

O esquema magneto-estrutural (Figura 3. 16) apresenta 9 domínios, cujos resultados serão expostos a seguir:

Domínio magneto-estrutural A: localizado no extremo NW do setor é caracterizado por uma extensa zona de valores mínimos e ausência de gradientes (Figuras 3. 4, 3. 11) e relaciona-se à zona transtensiva “La Trocha”, pertencente ao sistema de lineamentos NE (ver item 2. 2. 3). O domínio pode ser interpretado como um semi-graben, constituindo um bloco deprimido e formando uma das maiores bacias do AVC, denominada “Bacia Central”, com espessuras sedimentares de até 10 000 m (Figura 3. 6) .

Domínio magneto-estrutural B: encontra-se a N do setor e mostra um campo magnético anômalo de valores positivos, que diminuem a SW (Figura 3. 4), sem gradientes (Figura 3. 11). Pelas características do campo, o domínio é interpretado como um bloco semi-elevado, que mergulha para SW, sendo constituído por rochas plataformais da crosta continental da Plataforma das Bahamas. Sua evolução geológico-tectônica é relacionada aos eventos do sistema “Cubano” de direção NW-SE (ver item 2. 2. 3).

Domínio magneto-estrutural C: situa-se a NE do setor e apresenta campo magnético com valores positivos baixos até negativos, e fortes gradientes (Figuras 3. 4; 11). O resultado mostrado na Figura 3. 5 reflete a presença, em profundidade, de rochas magnéticas,

possivelmente compreendidas no embasamento da Plataforma das Bahamas, e cobertas pela mélanges de rochas pertencentes à AO e AVC, em função dos cavalgamentos provocados pelos eventos de direção NE-SW (ver item 2. 2. 4).

Domínio magneto-estrutural D: constituído por uma longa faixa de direção NW-SE, o campo magnético é caracterizado por valores positivos baixos até negativos em profundidade (Figuras 3. 4; 3. 5; 3. 6), e fortes gradientes (Figura 3. 11). Este domínio é relacionado à bacia de retro-arco do AVC (Iturralde-Vinent 1997), formando um bloco deprimido, produto dos eventos de direção NW-SE (sistema “Cubano”). É constituído, principalmente, por sedimentos da margem continental (Zona Remedios) e crosta oceânica (ofiolitos), deslocados pela influência da zona transtensiva “Camaguey”.

Domínio magneto-estrutural E: representado por duas zonas, caracterizadas por intensas anomalias de valores negativos de campo magnético anômalo (Figuras 3. 4; 3. 5) e ausência de gradientes (Figura 3. 11). Este domínio compreende dois blocos abatidos, formando parte da estrutura de bacia de retro-arco, preenchida com grandes espessuras de sedimentos.

Domínio magneto-estrutural F: ocupa a porção centro-oeste do setor, o campo magnético mostra intensos valores positivos, profundos e fortes gradientes de direção NW-SE (Figuras 3. 4, 3. 5; 3. 6; 3. 11). O domínio é relacionado a uma estrutura plutônica de composição média-básica, vinculada ao eixo magmático-plutônico do AVC. Como se pode observar nas Figuras 3. 12; 3. 13, efeitos tensionais direção NE provocam deformações na citada estrutura.

Domínio magneto-estrutural G: constitui uma longa faixa de direção NW-SE, limitada a N pelo domínio D e a sul pela falha “Cubana Axial”. O campo magnético apresenta-se variável, com valores positivos e fortes gradientes (Figuras 3. 4; 3. 11). O domínio constitui a borda setentrional da bacia axial do AVC (ver item 2. 2. 2) marcada pela presença de corpos plutônicos de composição intermediária-ácida (Marí 1997).

Domínio magneto-estrutural H: abrange uma ampla área, que se estende de SW a E do setor. É caracterizado por um campo magnético de valores positivos, ocasionalmente intensos, e fortes gradientes de direção NW (Figuras 3. 4, 3. 11, 3. 12). O domínio é constituído fundamentalmente por estruturas vulcânicas e mantos de lavas de composição básica-intermediária do AVC (Piñero *et al.* 1997), sendo sua evolução geológico-tectônica relacionada aos eventos de direção NW-SE na bacia axial do AVC (ver item 2. 2. 2). Mais a sul no domínio

aparecem setores anômalos, localmente intensos, possivelmente relacionados também a corpos plutônicos sob grandes pacotes de rochas vulcânicas. Como pode ser observado na Figura 3. 11, a intensidade do evento de direção NE afeta notavelmente as estruturas neste domínio.

Domínio magneto-estrutural I: posicionado em 3 áreas na borda sul do setor, compreende um campo magnético com valores negativos e ausência de gradiente (Figuras 3. 4; 3. 11), que torna-se mais positivo em profundidade (Figuras 3. 5; 3. 6). O domínio inclui bacias vinculadas à movimentos verticais, que seguiram à etapa de colapso do arco (Iturralde-Vinent 1997) e, controladas tectonicamente pelos lineamentos de direção NE. Essas bacias são constituídas por grandes espessuras de sedimentos, sob os quais aparecem corpos magnéticos anômalos. Esses corpos são possivelmente relacionados aos plutons pertencentes à estrutura descrita no domínio H ou alternativamente, constituem produto da reativação magmática ocorrida na fase tardia de evolução do arco, controlada pelos lineamentos do sistema “Camaguey” (Capote 1999).

3. 4. CONCLUSÕES

O espectro de potência mostrou profundidades estimativas das fontes magnéticas anômalas nos primeiros 0,5 km, 2 km e 10 km, respectivamente.

A partir das intensidades dos mapas processados de campo magnético anômalo foi confeccionado o mapa de domínios magnéticos, o qual apresenta os 4 principais: **Domínio A**, relacionado a corpos plutônicos do AVC; **Domínio B**, vinculado ao magmatismo do AVC e o contato deste com os blocos serpentiniticos pertencentes aos ofiolitos setentrionais; **Domínio C**, relacionado às rochas continentais da Plataforma das Bahamas; **Domínio D**, relacionado à zona de sutura marginal e bacias do setor.

Os mapas de derivadas e fase do sinal analítico foram de grande relevância na confecção do esquema de lineamentos. Neste, foram mostrados os três sistemas presentes no setor: o “Cubano” (NW-SE), “Camaguey” (NE) e “Banao” (N-S).

A integração dos mapas processados ao esquema de lineamentos resultou no esquema magneto-estrutural do setor, o qual foi compartimentado em 9 domínios, relacionados às principais estruturas e processos da evolução geológico-tectônica em Cuba Centro-Oriental.

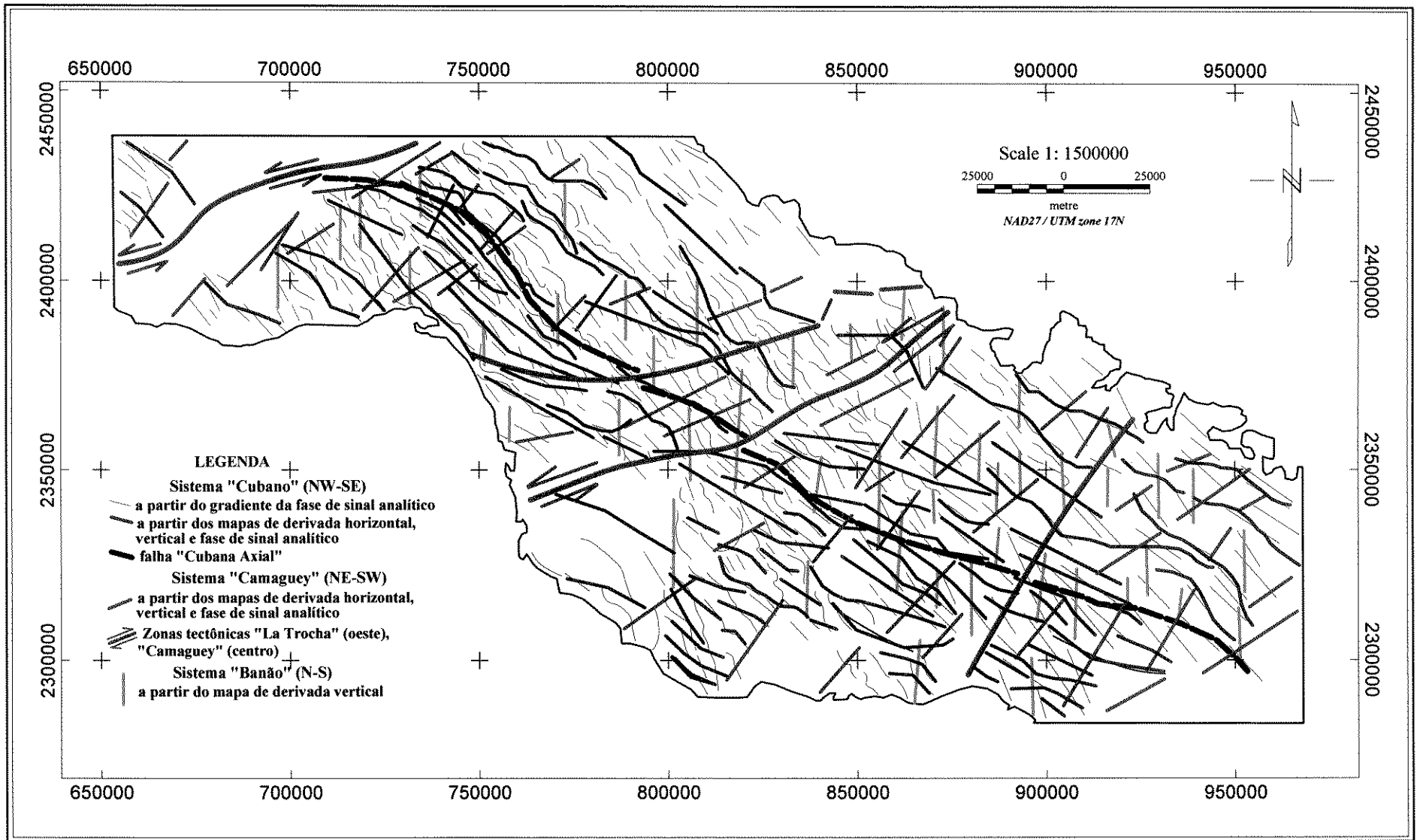


Figura 3. 15. Esquema de lineamentos do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

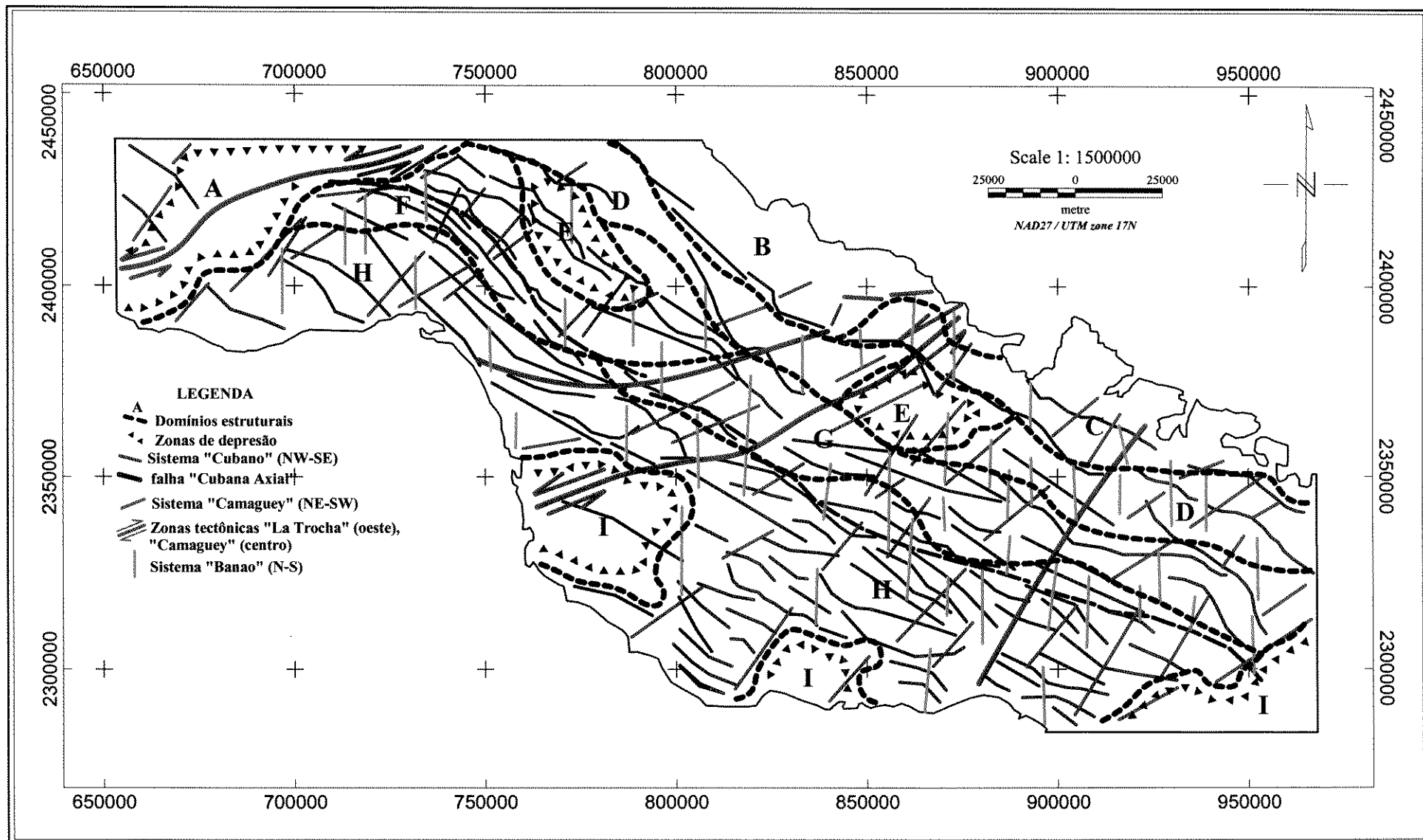


Figura 3. 16. Esquema magneto-estrutural do campo magnético anômalo, Cuba Centro-Oriental.

3. 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atchuta, D.; Ram, H. V.; Sanker, P. V. 1980. Relationship of magnetic anomalies due to subsurface features and interpretation of slopping contact. *Geophysics.*, **45**: 32-36.
- Baranov, V. 1957. A new methods for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics.*, **22**: 359-383.
- Baranov, V. e Naudy, H. 1964. Numerical calculation of the formula of reduction to the magnetic pole. *Geophysics.*, **29**: 517-531.
- Bhattacharyya, B. K. 1966. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to rectangular prismatic body. *Geophysics.*, **31**: 97-121.
- Bhattacharyya, B. K. 1969. Bicubic spline interpolation as a method for treatment of potential field data. *Geophysics.*, **34**: 402-423.
- Bhattacharyya, B. K. 1976. Recursion filters for digital processing of potential field data. *Geophysics.*, **41**: 712-726.
- Bhattacharyya, B. K. e Kuang, L. 1977. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies. *Geophysics.*, **42**: 41-50.
- Blakely, R. J. e Simpson, R. W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics.*, **51**: 1494-1498.
- Blum, M. L. B. 1999. *Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229 p.
- Briggs. I. C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics.*, **39**: 39-48.
- Capote, C. 1999. *Análise do controle estrutural e metalogenético em Cuba Centro-Oriental, com base em dados integrados*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 222 p.
- Clowes, R. 1986. Litho probe: Exploring the subduction zone of western Canada. *Geophysics.*, **6**: 12-19.
- Cressie, N. A. 1990. The Origins of Kriging. *Math Geology.*, **22**: 239-252.

- De Boor, C. 1962. Bicubic Spline interpolation. *Journal of Mathematic and Physicist.*, **41**: 212-218.
- Dean, C. W. 1954. Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation. *Geophysics.*, **23**: 97-127.
- Díaz, O. C.; Furrázola, B. G.; Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Estratigrafía de la zona Remedios. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 221-242.
- Elkins, T. A. 1951. The second derivate method of gravity interpretation. *Geophysics.*, **16**: 29-50.
- Feinberg, H.; Horen, H.; Michard, A.; Saddiqi, O. 1999. Obduction-related remagnetization at the base of an ophiolite. *Journal of Geophysical Research.*, **104**: 703-714.
- Gupta, V. K. e Ramani, N. 1982. Optimum second vertical derivative in geologic mapping and mineral exploration. *Geophysics.*, **47**: 1706-1715.
- Hansen, R. O. 1993. Interpretive gridding by anisotropic kriging. *Geophysics.*, **58**: 1491-1497.
- Hsu, S. K.; Sibuet, J. C.; Shyu, C. T. 1996. High-resolution detection of geological boundaries from potential-field anomalies: an enhanced analytical signal technique. *Geophysics.*, **61**: 373-386.
- Iturralde-Vinent, M. A. 1994. Introduction to Cuban Geology and Geophysics. In: *Cuban Ophiolites and Volcanic Arc. Project 364: Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Terrenes in the Circum Caribbean Realm*, Ciudad de la Habana, p.3-35.
- Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Introducción a la Geología de Cuba. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, p.35-68.
- Iturralde-Vinent, M. A.; Stanek, K.; Wolf, D.; Thieke, H. U.; Müller, H. 2000. Geology of the Camaguey Region, Central Cuba Evolution of a Collisional margin in the Northern Caribbean. In: Miller H. e Hervé F. *Zeitschrift für Angewandte Geologie (Geoscientific Cooperation with Latin America-31st International Geological Congress, Rio de Janeiro 2000)*, p.267-273.
- Jacobsen, B. M. 1987. A case for upward continuation as a standard separation filter for potential field map. *Geophysics.*, **52**: 1138-1148.

- Jones, D. 1986. Microcomputer field processing and interpretation in the mineral industry. *Geophysics.*, **4**: 46-60.
- Kekler, D. 1994. Surfer® for Windows. *User's Guide*. Golden Software, Inc. 350 p.
- Krige, D. G. 1966. Two-dimensional weighted moving average trend surface for ore valuation. *Journal South African Institute Mining and Metallurgy.*, **3**: 13-38.
- Liubi, L. I. e Martinova, T. V. 1982. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC), en el territorio de la provincia de Camagüey, escala 1:50.000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).
- Lufriú, L.; Padilla, I; Corbea, L. 1996. Notas explicativas al Mapa del campo Aeromagnético de la República de Cuba, escala 1: 250 000. In: SCG/Núcleo Geofísica, II Simposio Cubano de Geofísica, Ciudad de la Habana, *Resumos Expandidos*, GEO27.
- Marí, T. M. 1997. Particularidades de los Granitoides de Ciego de Avila-Camaguey-Las Tunas y consideraciones sobre su posición dentro del Arco de Islas. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 399-416.
- Mc Graht, P. H. 1991. Dip and depth extent of density boundaries using horizontal derivatives of upward-continued gravity data. *Geophysics.*, **56**: 1533-1542.
- Meschede, M. e Frisch, W. 1998. A plate-tectonic model for the Mesozoic and Early Cenozoic history of the Caribbean plate. *Tectonophysics*, **296**, 269-291.
- Meschede, M.; Frisch, W.; Chavez, A. L. C.; Saborio, A. L.; Calvo, C. 2000. The Plate Tectonic Evolution of the Caribbean Plate in the Mesozoic and Early Cenozoic. In: Miller H. e Hervé F. *Zeitschrift für Angewandte Geologie (Geoscientific Cooperation with Latin America-31st International Geological Congress, Rio de Janeiro 2000)*, p. 275-281.
- Nabighian, M. N. 1974. Additional comment on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics.*, **39**: 85-92.
- Nabighian, M. N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-sections its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics.*, **37**: 507-517.

- Nabighian, M. N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform: Fundamental relations. *Geophysics.*, **49**: 780-786.
- Nettleton, L. L. e Cannon, J. R. 1962. Investigation of upward continuation system. *Geophysics.*, **27**: 796-806.
- Padilla, I.; Lufriú, L.; Oviedo, A. 1996. Distribución y posición relativa de las fuentes profundas del Campo Aeromagnético de la república de Cuba, escala 1: 1 000 000. In: SCG/Núcleo Geofísica, II Simposio Cubano de Geofísica, Ciudad de la Habana, *Resumos Expandidos*, GEO70.
- Pardo, E. M. 1994. Zonación gravimétrica y modelo físico-geológico conceptual del cinturón doblado cubano. In: *Iturralde-Vinent, M.A. 1994. Cuban Ophiolites and Volcanic Arc. Project 364: Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Terrenes in the Circum Caribbean Realm*, Ciudad de la Habana, p.70-83.
- Pawloski, R. 1995. Preferential continuation for potential field anomaly enhancement. *Geophysics.*, **60**: 390-398.
- Pérez, R. M. e Sukar, S. K. 1997. Granitoides del Arco Volcánico Cretácico de la Región Central de Cuba (antigua provincia de Camaguey). In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 387-398.
- Peters, L.J. 1949. The direct approach to magnetic interpretation and its practical application. *Geophysics.*, **14**: 290-320.
- Pindell, J. L.; Cande, S. C.; Pitman III, W. C.; Rowley, D. B.; Dewey, J. F.; Labrecque, J.; Haxby, W. 1988. A plate-kinematic framework for models of Caribbean evolution. *Tectonophysics*, **155**, 121-138.
- Piñero, P. E.; Quintana, M. E.; Marí, M. T. 1997. Caracterización Geológica de los depósitos vulcanógeno-sedimentarios de la región de Ciego-Camaguey-Las Tunas. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 345-356.
- Prieto, C. R. L. e Brodovoi, R. 1986 *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC), en el sector Nuevitas-Guaimaro, escala 1:50.000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).

- Prieto, C. R. L.; Pascholati, E. M.; Amaral, G. 1997. Processamento Digital de Dados Aerogeofísicos (Magnetometria e Gamaespectrometria) da Folha Bayamo, SW de Cuba. In: SBGF, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 5., São Paulo, *Resumos expandidos*, 1: 588-590.
- Prieto, C. R. L.; Pascholati, E. M.; Amaral, G. 1998a. Interpretação do Levantamento Aeromagnético: Região de Camaguey (Cuba Centro-Oriental). In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, *Anais*, 391.
- Prieto, C. R. L.; Pascholati, E. M.; Amaral, G. 1998b. Procesamiento e interpretación de datos aeromagnéticos: Región de Ciego de Avila, Cuba Centro-Oriental. In SVG, IX Congreso Venezolano de Geofísica, II Conferencia Latinoamericana de Geofísica y I Simposio Internacional de Geofísica Minera., Caracas, *Memorias*, 60.
- Prieto, C. R. L.; Pascholati, E. M.; Amaral, G. 1999. Magnetic features on the Cretacic Island Arc Complex in Central-East Cuba. In: SBGF, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 6, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 134.
- Puscharowski, YU. M. (eds.) 1988. *Mapa geológico de la República de Cuba a escala 1: 250.000*. Academias de Ciencias de Cuba y la Unión Soviética. 40 p.
- Ribeiro, C. E. 1993. Transformação de Dados Aerogeofísicos em Imagens Raster utilizando Mínima Curvatura. In: SBGF, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 3, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 1013-1018.
- Roest, W. R.; Verhoef, J.; Pilkington, M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytical signal. *Geophysics.*, **57**: 116-125.
- Russanov, V. e Prieto, C. R. L. 1987. *Informe sobre los resultados de la Red de Apoyo Aerogeofísica Nacional, escala 1:50 000*. Ciudad de La Habana, IGP (Relatório técnico-econômico).
- Spector, A. e Grant, F. S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics.*, **35**: 293-302.
- Stanek, K. P.; Cobiella-Reguera J. L.; Maresch, W. V.; Trujillo G. M. Grafe, F.; Grevel C. 2000. Geological Development of Cuba. In: Miller H. e Hervé F. *Zeitschrift für Angewandte*

Geologie (Geoscientific Cooperation with Latin America-31st International Geological Congress, Rio de Janeiro 2000), p. 259-265.

Stanley, J. M. 1977. Simplified gravity interpretation by gradients the geological contact. *Geophysics.*, **42**: 1230-1235.

Stevanato, R.; Ferreira, F. J.; Soares, P. C. 1995. Desempenho de métodos de interpolação espacial na composição de mapas aerogeofísicos. In: SBGF, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 4, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 252-255.

Swain, C. J. 1976. A FORTRAN IV program for interpolating irregularly spaced data using the different equations for minimum curvature. *Computer e Geosciences.*, **1**: 231-240.

Thurston, J. B. e Smith, R. S. 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method. *Geophysics.*, **62**: 807-813.

Trejo, C. A. 1954. A note on downward continuation of Gravity. *Geophysics.*, **19**: 71-75.

CAPÍTULO 4. GRAVIMETRIA DE CUBA CENTRO-ORIENTAL. PROCESSAMENTO E RESULTADOS

4. 1. INTRODUÇÃO

A gravimetria é fundamental para o conhecimento estrutural, visto que mudanças no campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) relacionam-se à contrastes de densidades dos corpos geológicos em profundidade (Mironov 1977).

Os ambientes geológicos presentes em Cuba Centro-Oriental (Plataforma das Bahamas, Associação Ofiolítica e Arco Vulcânico Cretáceo), favorecem o conhecimento estrutural da área pois as unidades que os compõem apresentam contrastes de densidades. Com o objetivo de fornecer maior informação à interpretação regional e tectôno-estrutural na área de estudo, com base no processamento e interpretação dos dados gravimétricos, procura-se neste capítulo: a) estabelecer domínios gravimétricos, a partir da assinatura gravimétrica das unidades geológicas; b) relacionar assinatura gravimétrica às estruturas e ambientes geológicos; c) apresentar um esquema gravi-estrutural para Cuba Centro-Oriental.

4. 2 MATERIAIS E MÉTODOS

4. 2. 1 Materiais

De 1965 a 1968, diversos levantamentos gravimétricos foram realizados na região Centro-Oriental de Cuba, nas escalas de 1: 100 000 e 1: 50 000, compreendendo os territórios de “Ciego de Avila” até “Las Tunas”, com o objetivo de prospecção de petróleo e gás (Ipatenko 1966). As redes gravimétricas apresentam densidade de 1.3-2.2 pontos por km², com erro de *Bouguer* entre 0.38 mGal e 0.34 mGal. Estes dados foram posteriormente generalizados para a montagem de um mapa gravimétrico de anomalias de *Bouguer* na escala de 1:250.000, para a área de estudo.

Entre 1981-1990, com o auxílio de equipes da Alemanha oriental, foram realizados em Cuba levantamentos gravimétricos na escala de 1:50.000, com densidade na rede de observação de 4 pontos por km² e erro de *Bouguer* de 0.05 mGal, cobrindo uma área total de 7.664 km².

Neste capítulo foram utilizados os seguintes materiais:

1- base de dados gravimétrica (formato ASCII), obtida da digitalização do mapa gravimétrico (anomalia de *Bouguer*, $\sigma = 2.3 \text{ g/cm}^3$), na escala de 1:250.000 (cópia heliográfica), generalizado dos trabalhos na escala de 1:50.000 realizados nas províncias de Ciego de Avila, Camaguey e Las Tunas;

2- mapa Geológico da República de Cuba (Puscharowsky 1988), na escala de 1:250.000;

3- valores de densidade obtidos à partir de medições em laboratório, realizadas em amostras e testemunhos de furos de sondagem de rochas dos complexos geológicos de Cuba Centro-Oriental (Tabela 4. 1).

Tabela 4. 1. Valores de densidade dos complexos geológicos em Cuba Centro-Oriental (modificado de Pérez *et al.* 1998).

Denominação	Densidade ($\sigma = \text{t/m}^3$)	
	Mínimo	Máximo
Depósitos sedimentares de bacias meso-cenozóicas	2.35	----
Seqüências calcárias da margem continental	2.63	-----
Intercalações de dolomitos da margem continental	2.75	-----
Embasamento metamórfico da margem continental	2.78	2.83
Complexo serpentínico da associação ofiolítica	2.52	2.57
Complexo peridotítico (pouco ou não serpentinzado) da associação ofiolítica	2.78	2.83
Complexo plutônico de composição básica do arco vulcânico cretáceo	2.75	2.80
Complexo plutônico de composição básica-intermediária do arco vulcânico cretáceo	2.70	2.75
Complexo plutônico de composição intermediária do arco vulcânico cretáceo	2.65	2.70
Complexo plutônico de composição intermediária-ácida do arco vulcânico cretáceo	2.60	2.65
Complexo efusivo-sedimentar de composição básica do arco vulcânico cretáceo	2.70	2.75
Complexo efusivo-sedimentar de composição básica-intermediária do arco vulcânico cretáceo	2.65	2.70
Complexo efusivo-sedimentar de composição intermediária do arco vulcânico cretáceo	2.60	2.65
Complexo efusivo-sedimentar de composição intermediária-ácida do arco vulcânico cretáceo	2.55	2.60

4. 2. 2. Métodos

4. 2. 2. Métodos

4. 2.2. 1 Resgate da base de dados gravimétrica

O mapa gravimétrico (anomalia de *Bouguer*, $\sigma = 2.3 \text{ g/cm}^3$), na escala de 1:250.000, foi escaneado (“scanner” de tambor), obtendo-se um arquivo de imagem com formato TIFF. O processo de vetorização semi-automático foi realizado empregando o sistema de informação geo-referenciada ArcInfo. A seguir, serão descritas as diversas etapas utilizadas na obtenção do arquivo de dados no formato ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*):

A primeira etapa do processo constou da importação e geo-referenciamento da imagem, obtendo-se um erro médio quadrático (RMS) de 80 m, valor esse permissível no intervalo 60-125 m, para escalas 1:250.000.

A imagem retificada (geo-referenciada) foi interpolada pelo método do vizinho mais próximo, resultando numa malha com características similares à imagem original. Em seguida, foi criada uma “coverage”, ambiente que permite realizar a vetorização semi-automática da malha geo-referenciada. Uma vez concluído este processo, atribuiu-se valores de cota a cada contorno vetorizado da malha.

Finalmente, a “coverage” foi exportada no formato .DXF (*Drawing Interchange Files*), que trata-se de um arquivo tipo ASCII, compatível com programas gráficos. No ambiente do *software* Autocad, foi realizada uma minuciosa revisão do arquivo vetorial, verificando a existência de erros ocorridos durante o processo de vetorização semi-automática. Posteriormente o arquivo .DXF foi convertido para outro de formato ASCII, permitindo obter a base de dados a ser processada.

4. 2. 2. 2. Técnicas de Processamento

As seguintes técnicas de processamento foram aplicadas aos dados gravimétricos: interpolação em malha regular (Bhattacharyya 1966; Hansen 1993; Ribeiro 1993; Stevanato 1995), espectro de potência (Bhattacharyya e Kuang 1977; Spector e Grant 1970), continuação para cima (Peters 1949; Trejo 1954; Dean 1954; Netleton e Cannon 1962; Jacobsen 1987;

Pawlosky 1995), derivadas horizontais (Stanley 1977; Atchuta *et al.* 1980; Mc Granht 1991), derivada vertical (Peters 1949; Elkins 1951; Bhattacharyya 1976; Gupta e Ramani 1982) e amplitude e fase de sinal analítico (Bakley e Simpson 1986; Nabighian 1972, 1974, 1984; Thurston e Smith 1997). Estas técnicas foram descritas no capítulo 3, item 2. 2. 1.

4. 2. 2. 3. Técnicas de Interpretação

A interpretação teve como objetivo, numa primeira etapa, selecionar domínios a partir das intensidades das fontes gravimétricas e relacioná-los às estruturas geológicas presentes na área. Em seguida, procedeu-se à integração das respostas dos produtos gravimétricos para se obter o esquema de interpretação gravi-estrutural.

4. 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4. 3. 1. Resultados

4. 3. 1. 1. Interpolação em malha regular

A interpolação dos dados gravimétricos, de forma similar aos magnéticos (ver item 3. 3. 1. 1), foi realizada pelo método de Krigagem com variograma linear e célula de 250 m.

4. 3. 1. 2. Campo gravimétrico

A Figura 4. 1 mostra a complexidade do campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) na área, com valores entre -56 mGal e 62 mGal. Ao longo da porção N-NE da área, o campo gravimétrico apresenta intensidade gradual, variando de -12 mGal a 62 mGal. Nas porções centro-W, SW e SE, observam-se extensos campos de valores positivos, simétricos e com valores de até 62 mGal.

O campo gravimétrico, de valores negativos, está bem representado no setor. Na porção NW da área, o campo apresenta grande magnitude, com valores > - 20 mGal, sendo alongado segundo a direção NE-SW. Similares características são também observadas no centro-E, entretanto o acabamento do campo ocorre segundo a direção NW-SE. Já a SW e S, o campo mostra-se menos extenso e simétrico, com intensidades de até - 56 mGal.

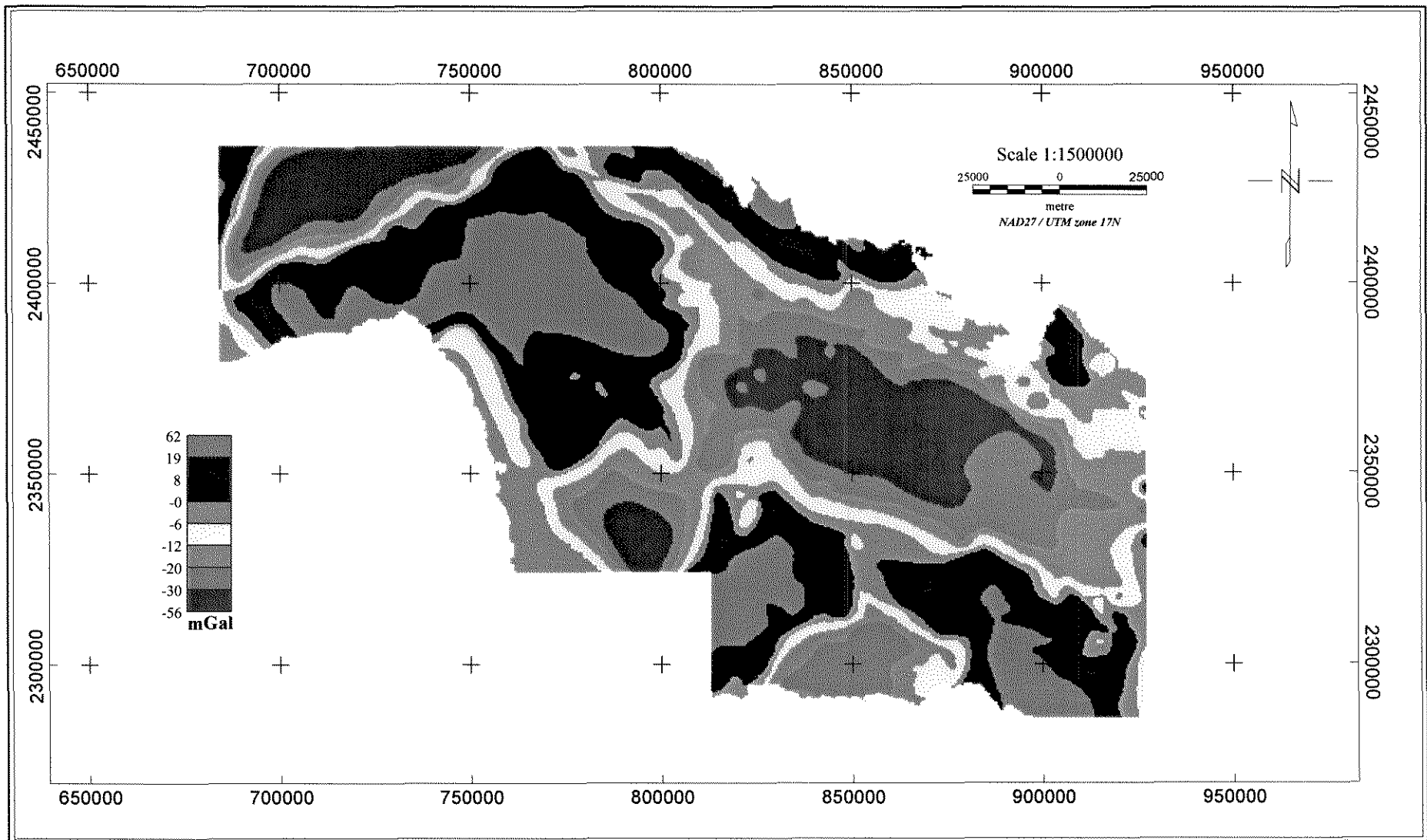


Figura 4. 1. Mapa do campo gravimétrico (anomalia de Bouguer), Cuba Centro-Oriental.

➤ - Espectro de Potência

O espectro de potência da área de estudo (Figura 4. 2) apresenta três partes distintas, da esquerda para a direita. A primeira (1), relacionada às fontes infracrustais, com profundidades médias de até 15 km e comprimentos de ondas de 0,05 rad/km. A segunda (2) reflete as fontes intracrustais, com profundidades médias entre 2,5 km e 4 km e comprimentos de onda de até ~0,57 rad/km. A terceira (3) mostra as fontes supracrustais com profundidades em torno de 0,5 km.

Os dados derivados do espectro sobre a estimativa das profundidades das fontes, serão nortearão os filtros a serem aplicados ao campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*).

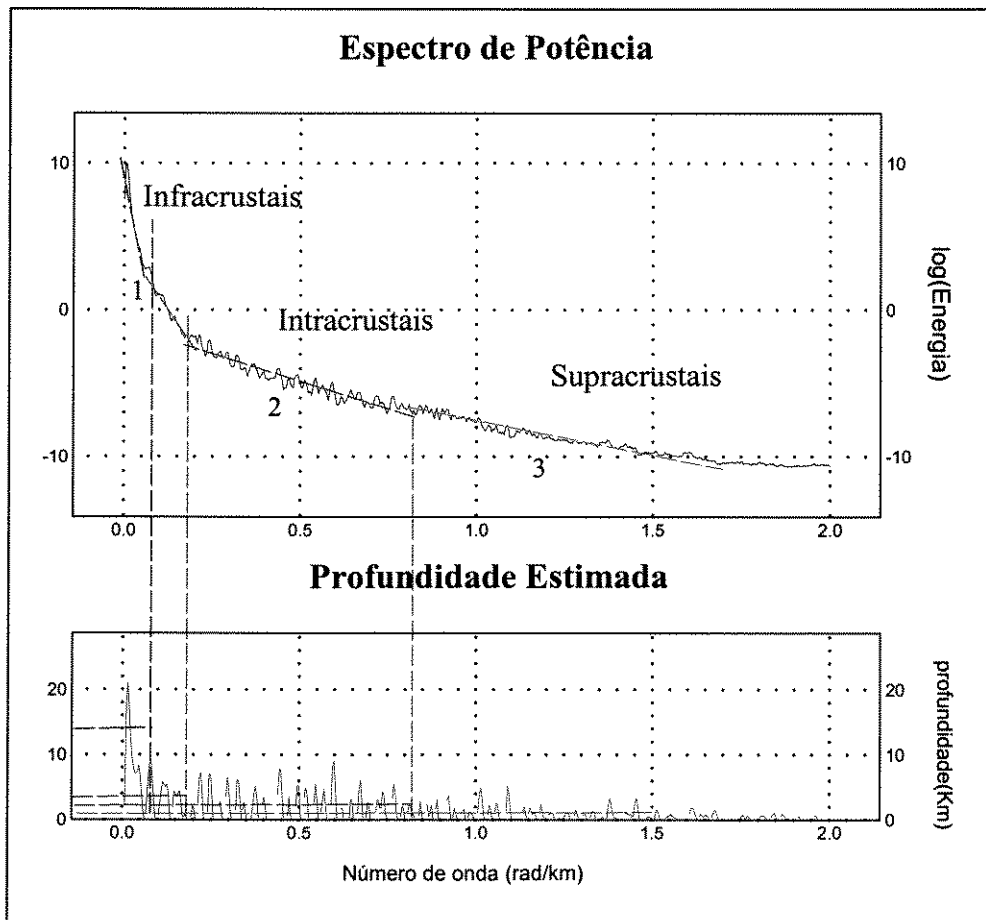


Figura 4. 2. Espectro de potência da anomalia de *Bouguer*.

➤ -Filtros aplicados

Os filtros selecionados foram agrupados naqueles que permitem separar as anomalias gravimétricas a partir da intensidade do campo (ex. continuação para cima), daqueles que realçam as fontes anômalas (ex. derivadas horizontais, vertical e fase do sinal analítico).

(I) Continuação para cima

As Figuras 4. 3 e 4. 4 representam as continuações para cima até 4000 m e 15000 m, respectivamente, levando em consideração os resultados do espectro de potência (Figura 4. 2). De forma geral, os resultados obtidos não mudam significativamente o quadro observado na Figura 4. 1. Nota-se, na porção N-NE da área, o campo gravimétrico de intensidade gradual, com valores máximos acompanhando a linha de costa e decrescendo para o interior do setor. A porção centro-O e SE apresentam o campo com extensas anomalias de valores positivos. O campo anômalo de valores negativos mantém-se bem destacado nas porções NW e centro-E do setor.

(II) Derivadas horizontais, vertical e fase do sinal analítico.

As imagens correspondentes às derivadas horizontais (Figuras. 4. 5, 4. 6) e vertical (4. 7) mostram as principais estruturas no setor, a partir do realce dos gradientes das fontes anômalas. Destaca-se, em toda a área, a existência de fortes gradientes de grande e médio comprimento de onda e de direção fundamentalmente NW-SE, eventualmente cortados por outros com tendência NE-SW, os quais contribuem para a divisão dos blocos estruturais da área de estudo.

A fase do sinal analítico (Figura. 4. 8) mostra gradientes intensos nas bordas das fontes anômalas, o que indica um mergulho quase vertical das estruturas que as constituem.

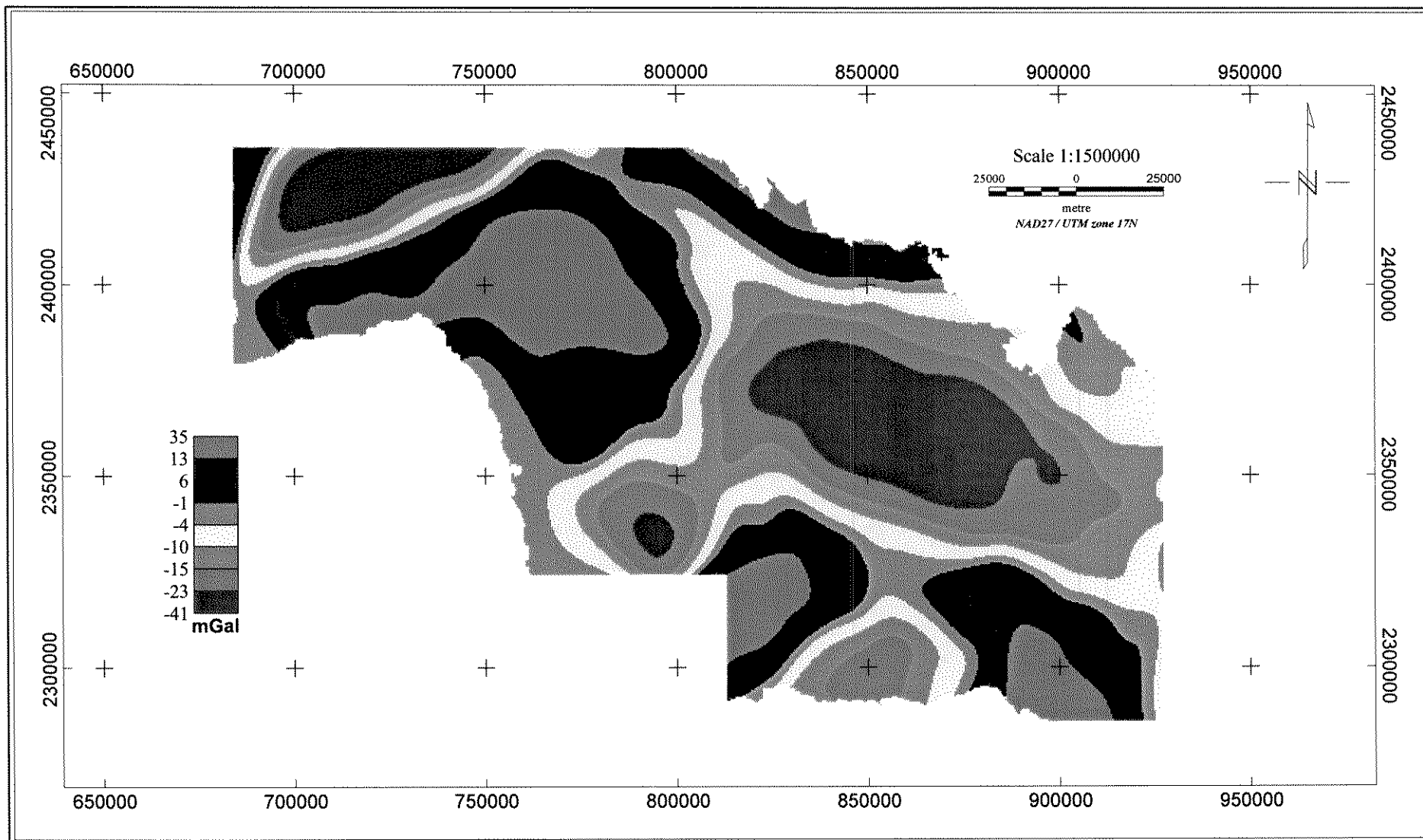


Figura 4. 3. Mapa de continuação para cima (4000 m) do campo gravimétrico (anomalia de Bouguer), Cuba Centro-Oriental.

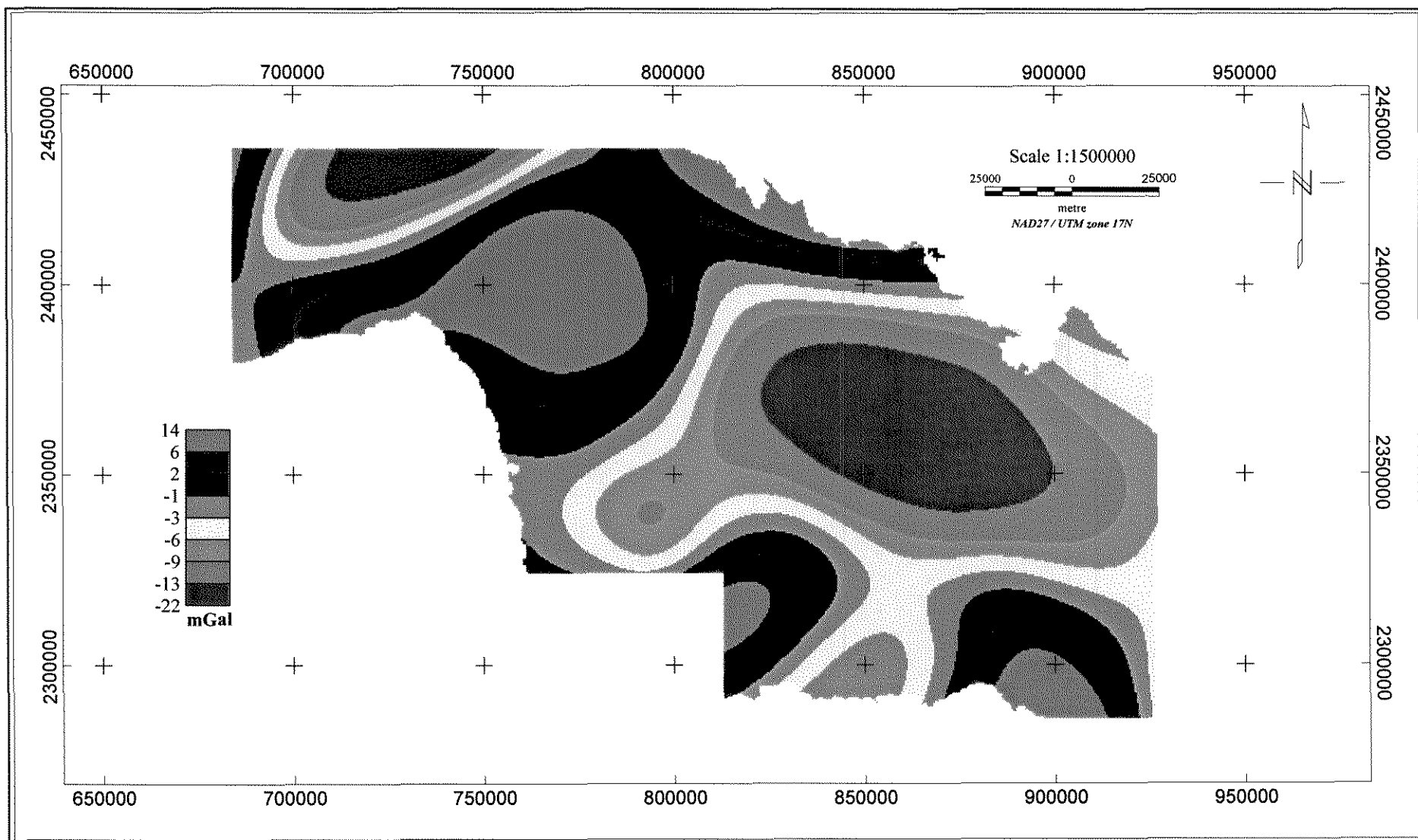


Figura 4. 4. Mapa de continuação para cima (15000 m) do campo gravimétrico (anomalia de Bouguer), Cuba Centro-Oriental.

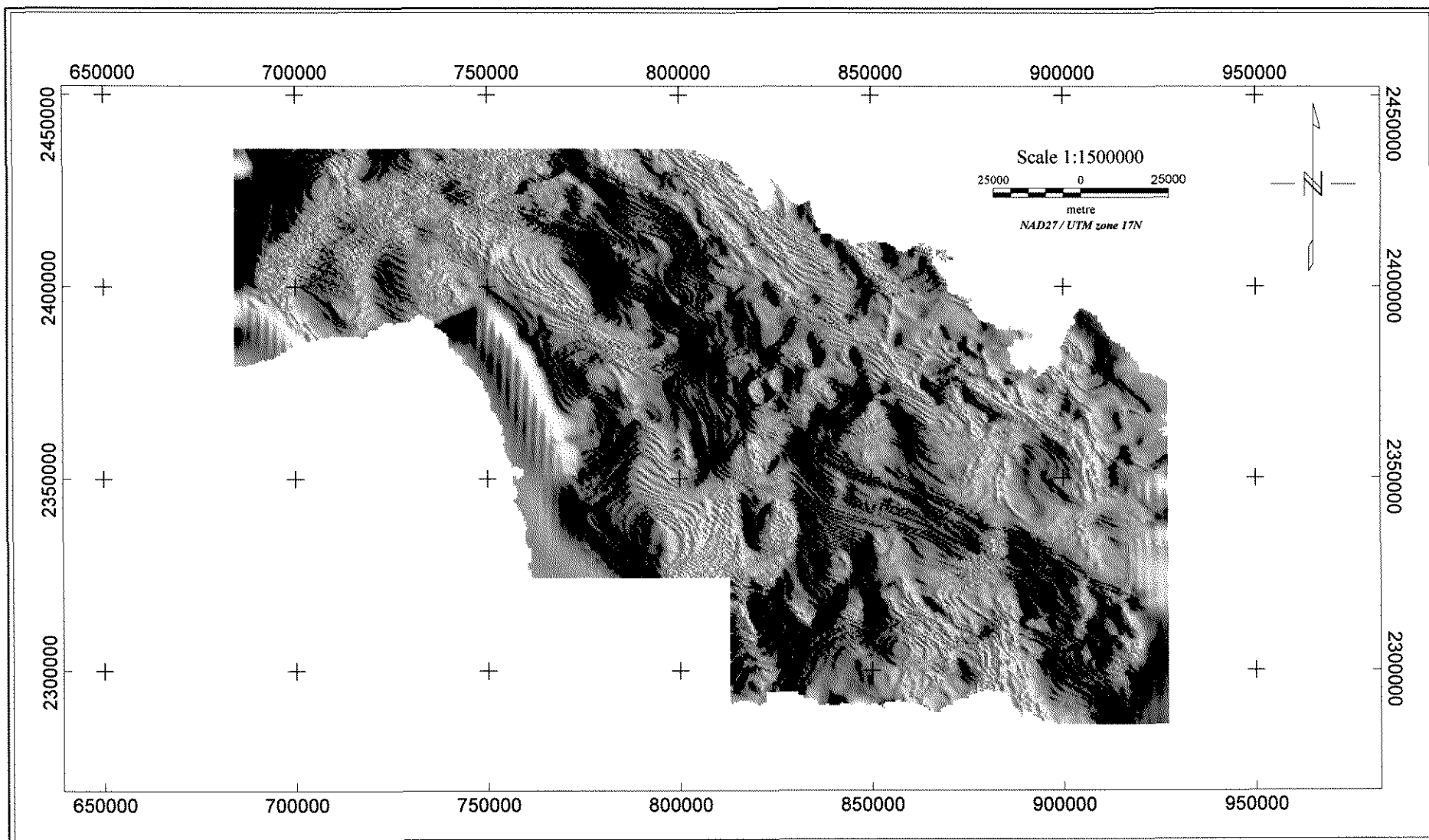


Figura 4. 5. Mapa de derivada horizontal em X do campo gravimétrico (anomalia de Bouguer), Cuba Centro-Oriental, (sombreamento sintético 45).

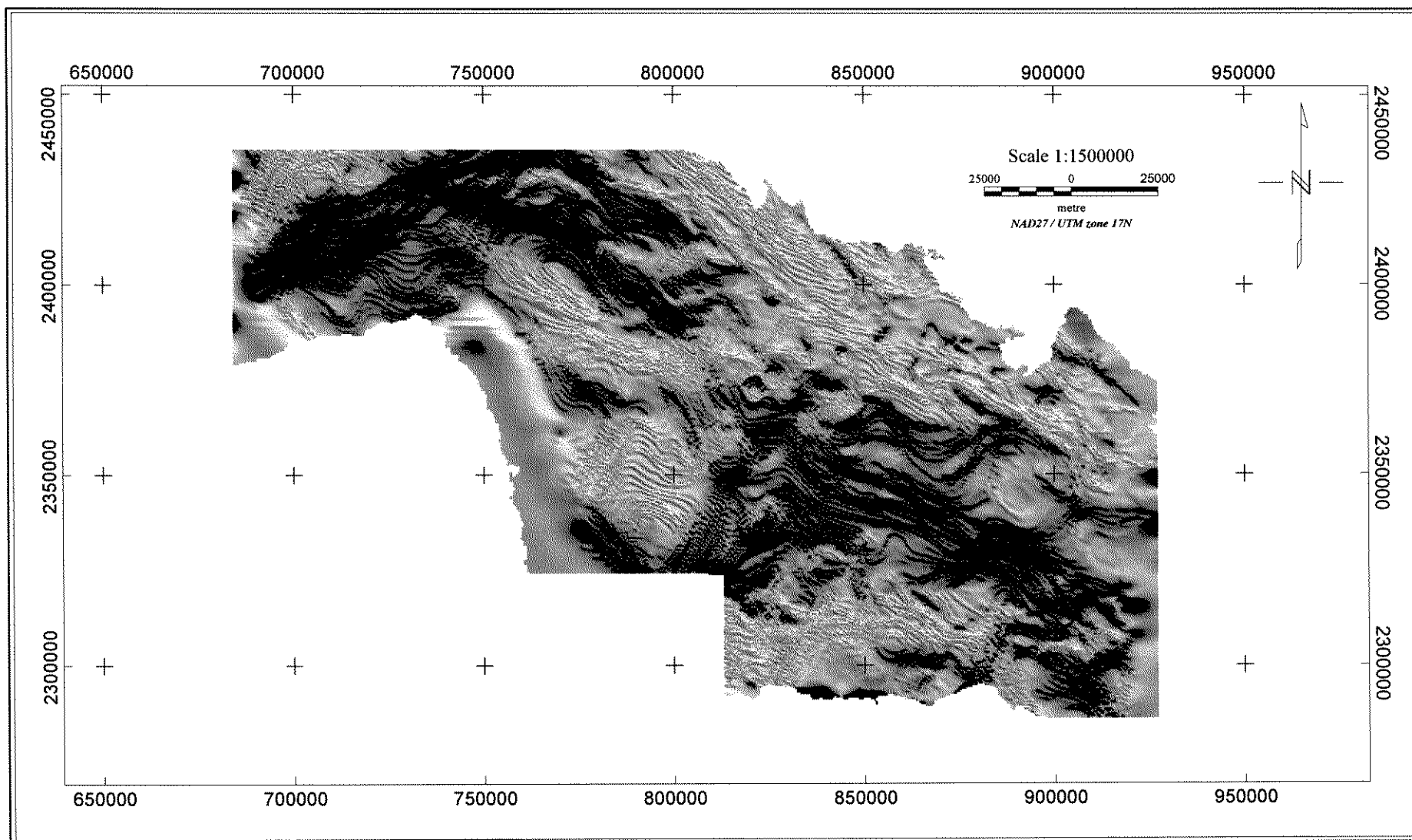


Figura 4. 6. Mapa de derivada horizontal em Y do campo gravimétrico (anomalia de Bouguer), Cuba Centro-Oriental, (sombreamento sintético 45).

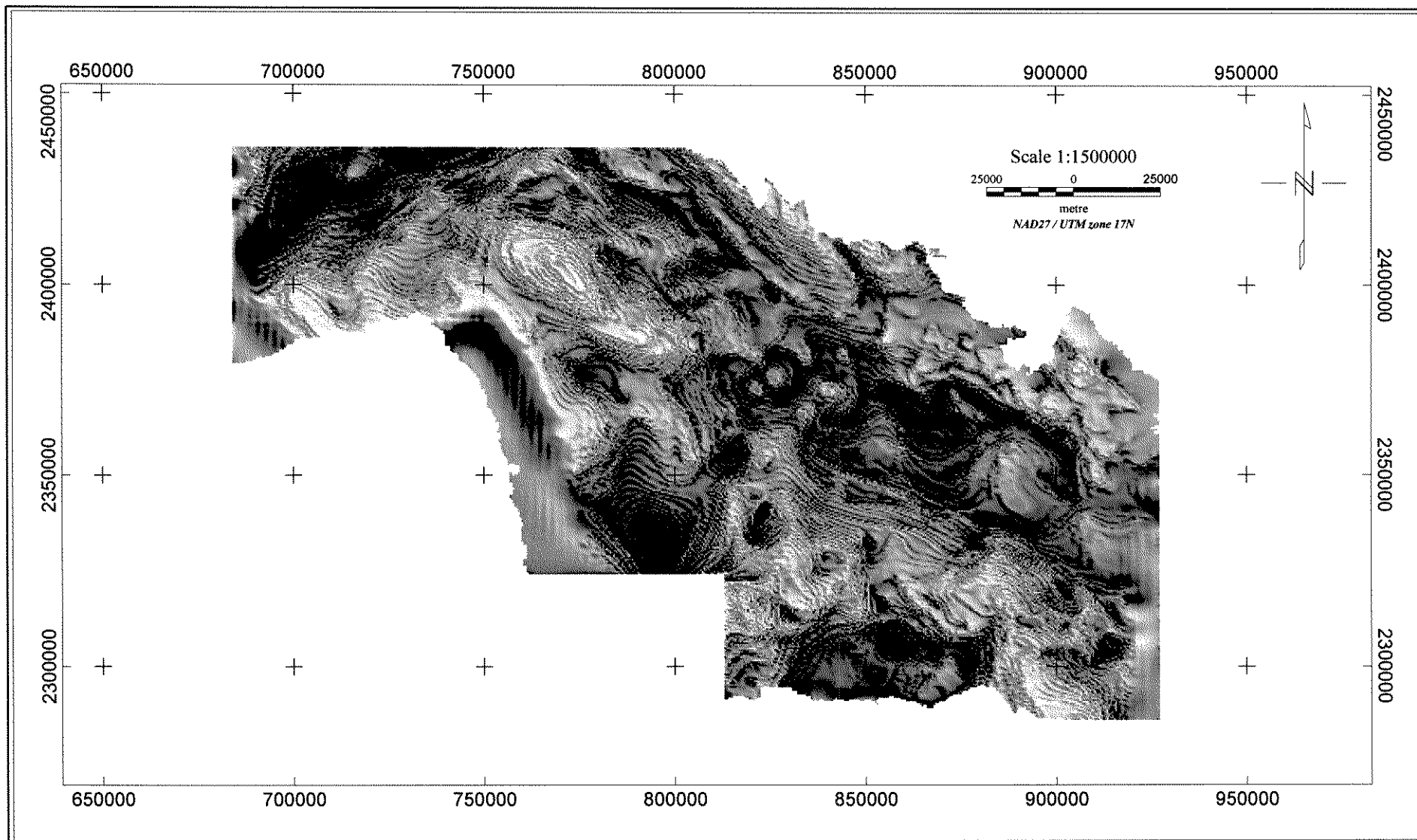


Figura 4. 7. Mapa de derivada vertical do campo gravimétrico (anomalia de Bouguer), Cuba Centro-Oriental, (sombreamento sintético 45).

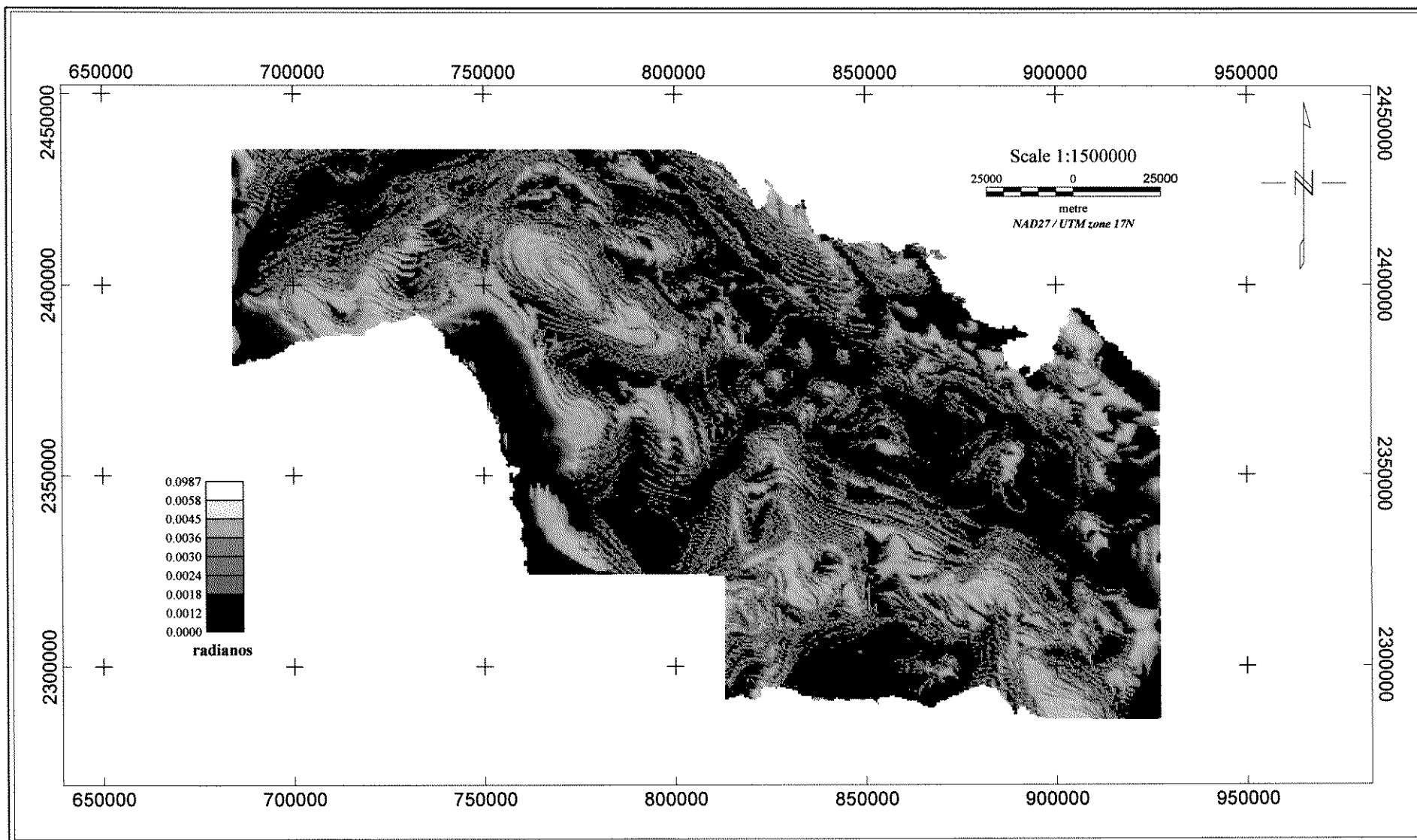


Figura 4. 8. Mapa de fase de sinal analítico do campo gravimétrico (anomalia de Bouguer), Cuba Centro-Oriental, (sombreamento sintético 45).

4. 3. 2. Discussão

4. 3. 2. 1. Interpretação do campo gravimétrico

Os resultados obtidos dos mapas processados de campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) mostram um quadro geofísico-estrutural complexo. A interpretação e integração dos produtos geraram como resultado o mapa de domínios gravimétricos e o esquema de interpretação gravi-estrutural.

(I) Mapa de domínios gravimétricos

Na elaboração do mapa de domínios gravimétricos (Figura 4.9) foram integrados os mapas de anomalias gravimétricas de *Bouguer* (Figura. 4. 1) e continuações para cima (Figuras. 4.3 e 4. 4), por serem os produtos que melhor revelaram as características do campo a partir das suas intensidades. Foram definidos 3 domínios, os quais serão discutidos a seguir:

Domínio A: encontra-se a norte, centro-oeste, sul e sudeste da área de estudo. Em geral, apresenta um campo de valores positivos, localmente intenso, com amplitude de até 69 mGal (Figura 4. 1), compreendendo fontes anômalas profundas (Figuras 4. 3; 4. 4). A natureza das anomalias pode variar dentro do próprio domínio. A norte (A-1), estão relacionadas, provavelmente à presença de rochas densas ($\sigma \sim 2.80 \text{ t/m}^3$), perto da superfície (produto do afinamento crustal), pertencentes ao embasamento metamórfico da margem Continental da Plataforma das Bahamas (Diaz *et al* 1997). A centro-oeste, sul e sudeste, as anomalias relacionam-se, possivelmente a corpos magmático-plutônicos (A-2), de composição básica e intermediária-básica do Arco Vulcânico Cretácico (Pérez e Sukar 1997), com densidade entre 2.70 t/m^3 e 2.80 t/m^3 .

Domínio B: mostra um campo de valores mistos, com amplitudes entre - 12 mGal e 19 mGal (Figura. 4. 1; 4. 3 e 4. 4). A faixa que vai desde o norte até o nordeste da área de estudo (B-1), pode ser relacionada ao contato dos depósitos continentais e oceânicos, separados pela zona de sutura (Bush e Sherbacova 1986). Esta zona é constituída por uma *mélange* ofiolítica ($\sigma \sim 2.55 \text{ t/m}^3$) e serve de contato tectônico entre os depósitos continentais da Plataforma das Bahamas e os oceânicos constituídos pela própria associação ofiolítica e o Arco Vulcânico Cretáceo. As áreas restantes do domínio compreendem o AVC, constituído por uma serie de

corpos intrusivos de composição intermediária-ácidas (B-2) (Marí 1997) e seqüências vulcânicas e efusivo-sedimentares (B-3) (Piñeiro *et al.* 1997).

Domínio C: apresenta o campo gravimétrico de intensos valores negativos, com amplitudes entre -12 mGal e -56 mGal (Figura. 4. 2). Este domínio é relacionado às estruturas de bacias com grandes espessuras de sedimentos de baixa densidade ($\sigma \sim 2.35 \text{ t/m}^3$), que alcançam até 15 km de profundidade (Figura.4. 4) nas porções noroeste (C-1), centro-leste (C-2) e sul (C-3) da área.

(I) Esquema de interpretação gravi-estrutural

O esquema de interpretação gravi-estrutural (Figura. 4. 10) foi confeccionado levando-se em consideração a integração dos produtos gerados a partir do mapa de anomalias de *Bouguer* (Figuras. 4. 3; 4. 4; 4. 5; 4. 6; 4. 7; 4. 8; 4. 9). A seguir, serão apresentados os 6 domínios determinados para a área de estudo:

Domínio gravi-estrutural A: situado no extremo NW do setor, mostra uma extensa zona de valores mínimos e gradientes de direção NE-SW (Figuras. 4. 1; 4. 5; 4. 6; 4. 7). Esse domínio é interpretado como um bloco deprimido (semi-graben) relacionado à zona transtensiva “La Trocha” (ver item 2. 2. 3), formando uma das maiores bacias da área, conhecida como “Bacia Central”, com profundidade de até 15 km (Figura. 4. 4).

Domínio gravi-estrutural B: encontra-se a N e NE da área de estudo, apresentando um campo anômalo gradativo de valores positivos (Figura. 4. 1). Este domínio compreende o bloco constituído pelos sedimentos continentais da Plataforma das Bahamas. Os valores mais intensos, a N, podem estar relacionados a rochas do embasamento metamórfico, que “mergulham” na direção SW, mostrando um campo de menor intensidade e gradiente mais intenso (Figuras. 4. 1; 4. 5; 4. 6; 4. 7; 4. 8). A evolução geológico-tectônica neste domínio está relacionada, principalmente, aos eventos de direção NW-SE (sistema “Cubano”), modificado pelos de direção NE (sistema “Camaguey”).

Domínio gravi-estrutural C: situa-se a nordeste do setor e divide o domínio B em 2 blocos. O campo gravimétrico apresenta-se aqui com valores positivos de baixa intensidade até negativos de altos gradientes a sul (Figuras. 4. 1; 4. 5; 4. 6; 4. 7). Esse domínio pode ser considerado como um bloco deprimido em relação aos contíguos. As rochas mais densas são

representadas pelo embasamento metamórfico da Plataforma das Bahamas, à maior profundidade (Figuras 4. 3; 4. 4; 4. 8), eventualmente sobrepostas por sedimentos oceânicos, como consequência de deslocamentos e cavalgamentos provocados pelas falhas de direção NE-SW (ver item 2. 2. 5).

Domínio gravi-estrutural D: constitui uma faixa alongada de direção NW-SE, estando o campo caracterizado por valores positivos baixos até negativos (Figura. 4. 1) e altos gradientes (Figuras. 4. 5; 4. 6; 4. 7). O domínio é considerado como um bloco deprimido com mergulho quase vertical (Figura. 4. 8), relacionado à zona de sutura, e constituído por sedimentos da margem continental (Zona Remedios) e oceânicos (ofiolitos-arco vulcânico) (Iturralde-Vinent 1997; Iturralde-Vinent *et al.* 2000). Os eventos de direção NW-SE (sistema “Cubano”) e NE, especificamente a zona transtensiva “Camaguey”, são responsáveis pela estruturação deste domínio, sub-dividindo-o em 2 setores e causando subsidência de porções internas.

Domínio gravi-estrutural E: abrange uma extensa área à oeste, centro e sudeste da área de estudo. A Figura 4. 1 mostra um campo gravimétrico de valores positivos, ocasionalmente intenso nas porções central e sul, com altos gradientes de direção NW (Figura 4. 7). Observa-se também, na Figura 4. 8, o mergulho das fontes anômalas marcado pelos gradientes de direção NW e NE, tornando-se quase vertical a sul.

Este domínio é constituído pelos complexos plutônicos cretácicos, estando sua evolução geológico-tectônica relacionada à bacia axial do arco (ver item 2. 2. 2). Os eventos tectônicos predominantes de direção NW-SE, especificamente a Falha “Cubana Axial”, são responsáveis pela presença dos complexos plutônicos localizados ao longo da porção setentrional do citado domínio (Marí 1997), sendo constituído, mais a sul, por estruturas vulcânicas e mantos de lavas pertencentes ao magmatismo vulcânico e efusivo-sedimentar do arco (Piñero *et al.* 1997).

Neste domínio observam-se ainda três áreas de intensos valores positivos, profundas (Figuras. 4. 1; 4. 3; 4. 4), possivelmente relacionadas à rochas de alta densidade ($\sigma \sim 2.80 \text{ t/m}^3$), pertencentes a aparelhos plutônicos de composição intermediária-básica, que constituem blocos elevados dentro do Arco Cretácico.

Domínio gravi-estrutural F: caracterizado por intensas anomalias de valores negativos de campo gravimétrico anômalo (Figura. 4. 1), sendo representado, ao sul da área, por duas zonas arredondadas. Este domínio representa dois blocos deprimidos controlados por lineamentos de

direção NE e relacionados a bacias com grandes espessuras de sedimentos, de até 4 km (Figura 4. 3).

4. 4. CONCLUSÕES

O espectro de potência mostrou profundidades estimativas das fontes gravimétricas s a 0,5 km, 2,5-4 km e 15 km.

O mapa de domínios gravimétricos foi confeccionado a partir dos mapas de anomalias gravimétricas de *Bouguer* e com continuação para cima até 4 000 m e 15 000 m. Foram selecionados 3 domínios: **Domínio A**, associado a rochas de alta densidade, possivelmente relacionadas, na porção norte da área, ao embasamento metamórfico da margem continental da Plataforma das Bahamas, e ao centro e sul, à corpos profundos pertencentes ao magmatismo-plutônico do Arco Vulcânico Cretáceo; **Domínio B**, a norte, relacionado à sedimentos continentais e oceânicos na zona de sutura e, nas porções restantes, às rochas intrusivas magmáticas e vulcâno-sedimentares do Arco Vulcânico Cretáceo; **Domínio C**, relacionado a grandes espessuras de sedimentos de baixa densidade.

A integração dos mapas processados e interpretados resultou no esquema de interpretação gravi-estrutural, no qual foram determinados 6 domínios, relacionados às principais estruturas e processos da evolução geológico-tectônica em Cuba Centro-Oriental.

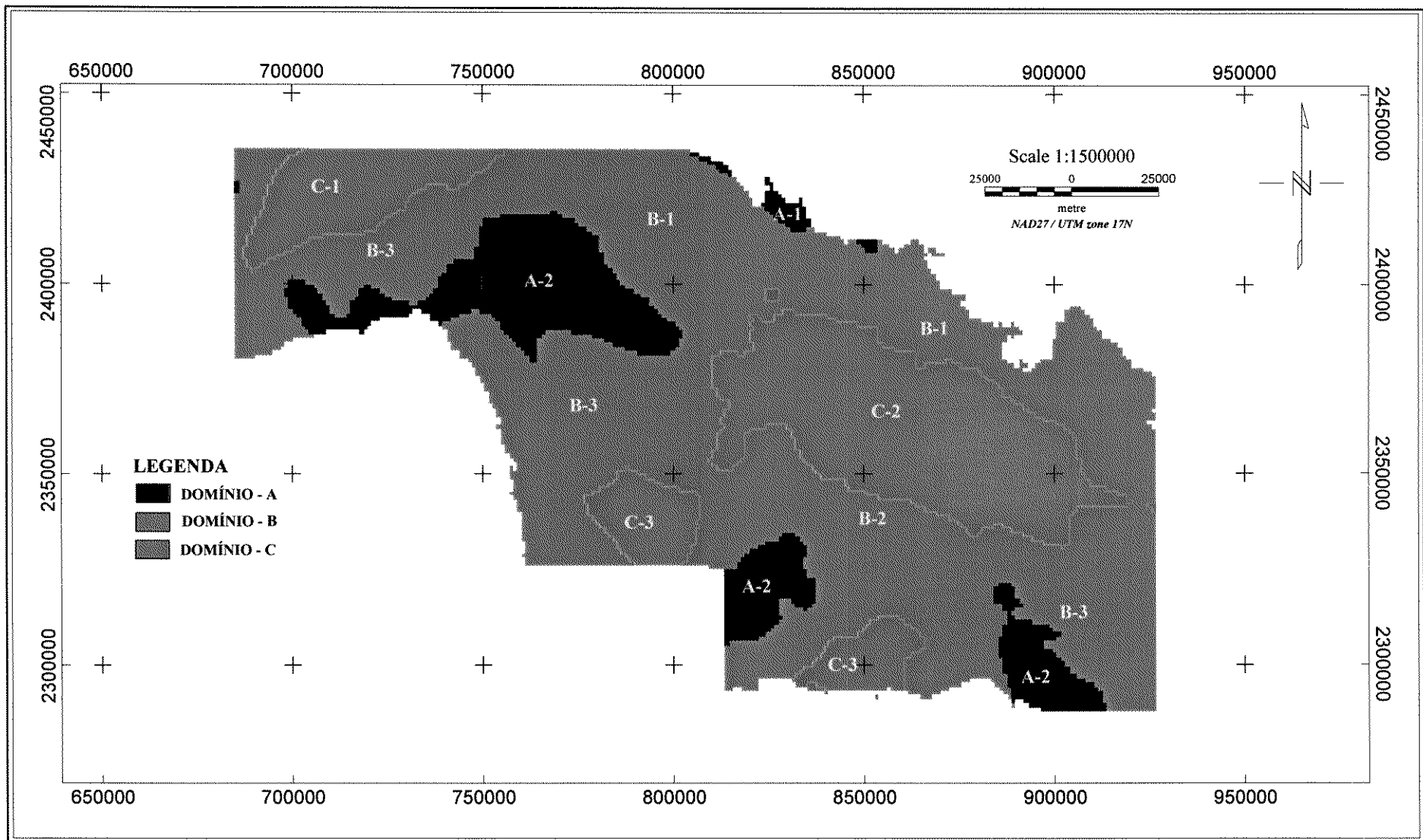


Figura 4. 9. Esquema de domínios gravimétricos do campo gravimétrico (anomalia de Bouguer), Cuba Centro-Oriental.

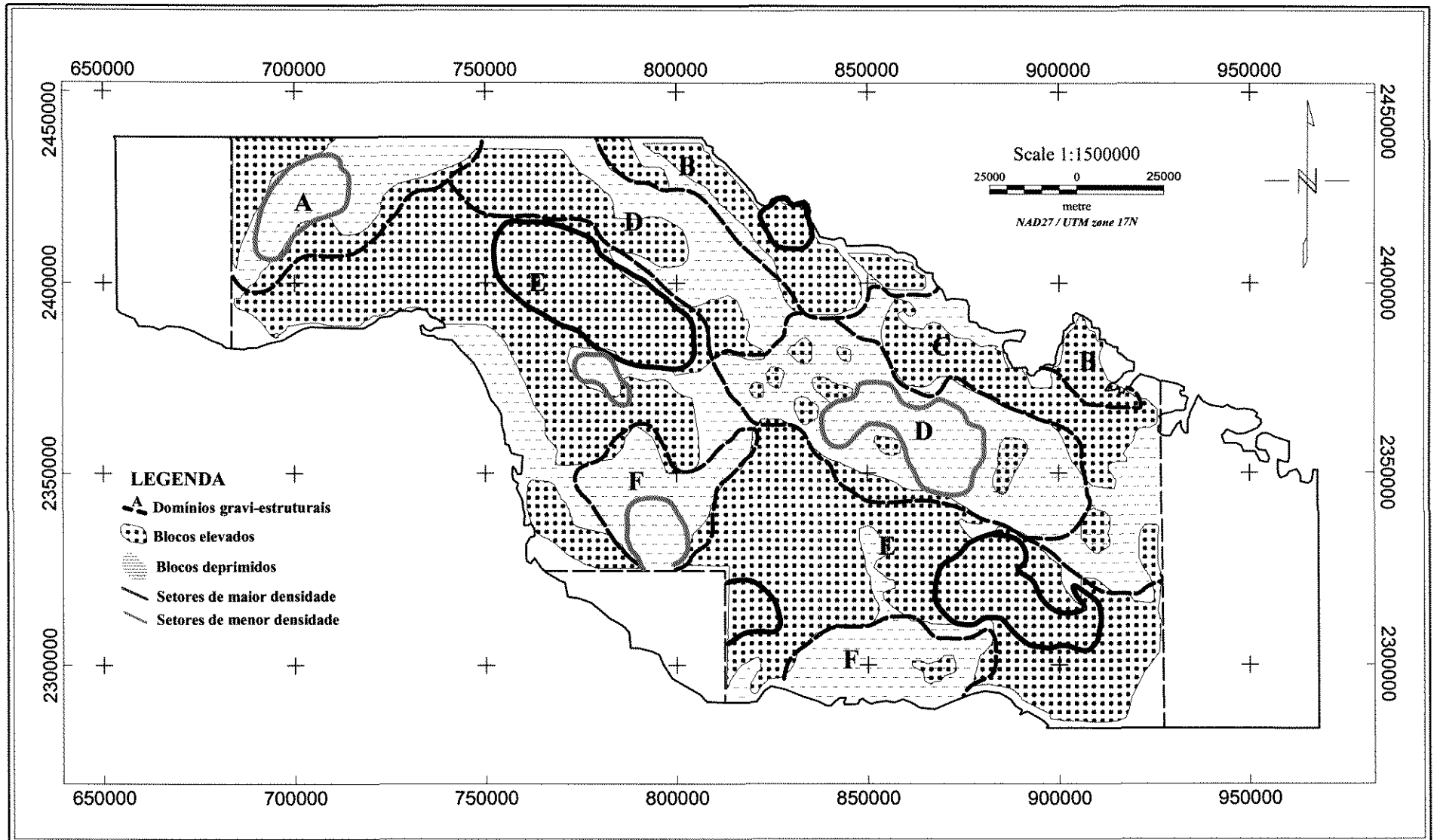


Figura 4.10. Esquema de interpretação gravi-estrutural, Cuba Centro-Oriental.

4. 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Atchuta, D.; Ram, H. V.; Sanker, P. V. 1980. Relationship of magnetic anomalies due to subsurface features and interpretation of slopping contact. *Geophysics.*, **45**: 32-36.
- Bhattacharyya, B. K. 1966. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to rectangular prismatic body. *Geophysics.*, **31**: 97-121.
- Bhattacharyya, B. K. 1969. Bicubic spline interpolation as a method for treatment of potential field data. *Geophysics.*, **34**: 402-423.
- Bhattacharyya, B. K. 1976. Recursion filters for digital processing of potential field data. *Geophysics.*, **41**: 712-726.
- Bhattacharyya, B. K. e Kuang, L. 1977. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies. *Geophysics.*, **42**: 41-50.
- Blakely, R. J. e Simpson, R. W. 1986. Approximating edges of source bodies from magnetic or gravity anomalies. *Geophysics.*, **51**: 1494-1498.
- Bush, V. e Sherbacova, B. 1986. New data on the deep tectonics of Cuba. *Geotectonic.*, **3**: 24-43.
- Dean, C. W. 1954. Frequency analysis for gravity and magnetic interpretation. *Geophysics.*, **23**: 97-127.
- Díaz, O. C.; Furrázola, B. G.; Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Estratigrafía de la zona Remedios. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 221-242.
- Elkins, T. A. 1951. The second derivate method of gravity interpretation. *Geophysics.*, **16**: 29-50.
- Gupta, V. K. e Ramani, N. 1982. Optimum second vertical derivative in geologic mapping and mineral exploration. *Geophysics.*, **47**: 1706-1715.
- Hansen, R. O. 1993. Interpretive gridding by anisotropic kriging. *Geophysics.*, **58**: 1491-1497.
- Ipatenko, S. 1966. *Mapa gravimétrico generalizado para la región Ciego-Camaguey-Las Tunas a escala 1: 250 000*. Academia de Ciencias de Cuba.
- Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Introducción a la Geología de Cuba. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, p.35-68.

- Iturralde-Vinent, M. A.; Stanek, K.; Wolf, D.; Thieke, H. U.; Müller, H. 2000. Geology of the Camaguey Region, Central Cuba Evolution of a Collisional margin in the Northern Caribbean. In: Miller H. e Hervé F. *Zeitschrift für Angewandte Geologie (Geoscientific Cooperation with Latin America-31st International Geological Congress, Rio de Janeiro 2000)*, p.267-273.
- Jacobsen, B. M. 1987. A case for upward continuation as a standard separation filter for potential field map. *Geophysics.*, **52**: 1138-1148.
- Mari, T. M. 1997. Particularidades de los Granitoides de Ciego de Avila-Camaguey-Las Tunas y consideraciones sobre su posición dentro del Arco de Islas. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 399-416.
- Mc Granth, P. H. 1991. Dip and depth extent of density boundaries using horizontal derivatives of upward-continued gravity data. *Geophysics.*, **56**: 1533-1542.
- Mironov, V. S. 1977. *Curso de Prospección Gravimétrica*, Ed. Reverté S. A, 525 p.
- Nabighian, M. N. 1974. Additional comment on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics.*, **39**: 85-92.
- Nabighian, M. N. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-sections its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics.*, **37**: 507-517.
- Nabighian, M. N. 1984. Toward a three-dimensional automatic interpretation of potential field data via generalized Hilbert transform: Fundamental relations. *Geophysics.*, **49**: 780-786.
- Nettleton, L. L e Cannon, J. R. 1962. Investigation of upward continuation system. *Geophysics.*, **27**: 796-806.
- Pawloski, R. 1995. Preferential continuation for potential field anomaly enhancement. *Geophysics.*, **60**: 390-398.
- Pérez, P. E.; Pimentel, O. H.; Pardo, E. M.; Lugo, P. R. 1998. *Interpretación tectónico-estructural de los datos geofísicos en la región Ciego de Avila-Camaguey-Las Tunas*. Empresa Geominera de Camaguey (Relatório técnico-económico).

- Pérez, R. M. e Sukar, S. K. 1997. Granitoides del Arco Volcánico Cretácico de la Región Central de Cuba (antigua provincia de Camaguey). In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 387-398.
- Peters, L.J. 1949. The direct approach to magnetic interpretation and its practical application. *Geophysics.*, **14**: 290-320.
- Piñero, P. E.; Quintana, M. E.; Marí, M. T. 1997. Caracterización Geológica de los depósitos vulcanógeno-sedimentarios de la región de Ciego-Camaguey-Las Tunas. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 345-356.
- Puscharowski, YU. M. (eds.) 1988. *Mapa geológico de la República de Cuba a escala 1:250.000*. Academias de Ciencias de Cuba y la Unión Soviética. 40 p.
- Ribeiro, C. E. 1993. Transformação de Dados Aerogeofísicos em Imagens Raster utilizando Mínima Curvatura. In: SBGF, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 3, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 1013-1018.
- Spector, A. e Grant, F. S. 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics.*, **35**: 293-302.
- Stanley, J. M. 1977. Simplified gravity interpretation by gradients at the geological contact. *Geophysics.*, **42**: 1230-1235.
- Stevanato, R.; Ferreira, F. J.; Soares, P. C. 1995. Desempenho de métodos de interpolação espacial na composição de mapas aerogeofísicos. In: SBGF, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 4, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 252-255.
- Thurston, J. B. e Smith, R. S. 1997. Automatic conversion of magnetic data to depth, dip, and susceptibility contrast using the SPI (TM) method. *Geophysics.*, **62**: 807-813.
- Trejo, C. A. 1954. A note on downward continuation of Gravity. *Geophysics.*, **19**: 71-75.

CAPÍTULO 5. LEVANTAMENTO AEROGAMAESPECTROMÉTRICO DE CUBA CENTRO-ORIENTAL. PROCESSAMENTO E RESULTADOS

5. 1. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a gamaespectrometria tem-se mostrado como uma ferramenta indispensável ao mapeamento e à exploração mineral. O método é capaz de detetar concentrações dos radioelementos K, Th e U em materiais geológicos, permitindo o mapeamento de anomalias relacionadas à composição primordial das rochas ou de produtos de processos de alteração (Galbraith e Saunders 1983). Embora vantajoso em muitos aspectos, o método é limitado pelo seu baixo poder de penetração na superfície (~ 60 cm).

A área de estudo é geologicamente constituída por unidades de natureza continental (Plataforma das Bahamas) e oceânicas (Associação Ofiolítica e Arco Vulcânico Cretáceo) que, por sua vez, são cobertas por grandes espessuras de sedimentos do Eoceno superior (Iturralde-Vinent, 1997).

O presente trabalho tem entre seus objetivos apresentar as características radiogeoquímicas das rochas presentes na área de estudo a partir da resposta dos radioelementos K, Th e U. Assim sendo, foram aplicadas à base de dados gamaespectrométrica, técnicas de processamento digital de imagens como composições coloridas, mapas ternários (Duval 1985) e principais componentes (Drury 1993). Outras, como normalização de potássio (Pires 1995), serviram para mostrar a contribuição predominante de determinado radioelemento, levando à definição da especialização radiogeoquímica da área de estudo (Portnov 1987).

5. 2. MATERIAIS E MÉTODOS

5. 2. 1. Materiais

O levantamento aerogamaespectrométrico na escala de 1: 50 000 de Cuba Centro-Oriental (área de estudo), foi realizado em 3 áreas (26 607 km²), com linhas de vôo na direção N-S, espaçadas de 500 m e pontos de amostragem a cada 50 m, sendo as de controle (amarração), de

direção E-W, espaçadas de 5 km. A rede de apoio do levantamento aerogeofísico complexo (LAGC) em setores planos, consistiu na realização de linhas de vôo de controle (geralmente E-W) em todo o território nacional. O objetivo da rede foi amarrar os setores levantados em diferentes datas para realizar a compensação do campo físico (gamaespectrométrico).

O levantamento foi realizado com uma aeronave AN-2 de fabricação russa, com altura de vôo de 60 m controlada por um radar altímetro. A exatidão da correção pela altura, foi de 5 m e planimétrica, de 50 m. A navegação foi controlada através do equipamento aerofotográfico AFAG-17, com pontos de orientação a cada 3.6 km.

Na aquisição dos dados aerogamaespectrométricos foi utilizado um gamaespectrometro AGS-71S, equipado com cristais de Iodeto de Sódio ativado a Tálcio de fabricação russa, medindo os espectros energéticos de contagem total (CT), urânio (U), tório (Th) e potássio (K) em cinta de papel perfurado.

Os dados obtidos do LAGC tiveram duas etapas de processamento. A primeira, durante os trabalhos de levantamento aéreo e a segunda, no centro de processamento digital na antiga URSS. Na primeira etapa, as medições aerogamaespectrométricas foram controladas diariamente com padrões de elementos radioativos conhecidos e foram realizados vôos periódicos sobre áreas, também padrões (polígonos), com o objetivo de controlar a sensibilidade do equipamento e realizar o processo de calibração.

Na segunda etapa, os dados de campo foram processados digitalmente na antiga URSS. Os dados gamaespectrométricos foram inicialmente filtrados, com o intuito de suavizar as linhas de vôo; posteriormente, foram aplicadas correções na altura de vôo, eliminação do efeito *Compton* e ruído de fundo (*background*), obtendo-se finalmente os resultados em níveis de concentração.

Finalmente, os resultados obtidos para cada setor levantado foram “amarrados” à partir da rede de apoio. O erro médio quadrático de nivelamento nas concentrações dos elementos radiativos foi:

Urânio (U).....0.19 ppm

Tório (Th).....0.27 ppm

Potássio (K).....0.16 %

Os dados gamaespectrométricos foram interpolados linearmente, resultando um conjunto de mapas de curvas de contorno (em papel) de contagem total, urânio, tório e potássio, nas escalas de 1:50.000, 1:100.000 e 1:250.000. Como produto final, foram confeccionados relatórios técnico-econômicos de cada setor levantado (Liubi e Martinova 1982; Prieto e Brodovoi 1986; Russanov e Prieto 1987).

Os materiais utilizados neste capítulo foram:

1- Base de dados gamaespectrométrica (formato ASCII) resgatada dos mapas de contagem total (CT), urânio (U), tório (Th) e potássio (K) na escala de 1:250 000 (em papel heliográfico), das folhas cartográficas “Ciego de Avila”, “Camaguey” e “Las Tunas”;

2- Mapa Geológico da República de Cuba (Puscharowsky 1988), na escala de 1:250.000;

3- Mapas topográficos confeccionados pelo Instituto de Geodésica e Cartografia, na escala de 1:250.000.

5. 2. 2. Métodos

5. 2. 2. 1. Técnicas de Processamento

O processamento dos dados gamaespectrométricos começou pela interpolação da base de dados obtida do LAGC. Uma vez visualizados os resultados, observou-se ruídos e distorções nos mapas, que não correspondiam aos produtos obtidos no levantamento original. Levando em consideração este fato, optou-se pela digitalização dos mapas de curvas de contorno gamaespectrométricos (num total de 12) na escala 1:250.000 da área de estudo, com o objetivo de resgatar a base de dados.

➤ Resgate da base de dados gamaespectrométrica

Os mapas de contagem total, urânio, tório e potássio, na escala de 1:250.000, foram escaneados (“scanner” de tambor), obtendo-se arquivos de imagem no formato TIFF. O processo obtenção do arquivo de dados no formato ASCII, foi similar ao descrito no epígrafe 4. 2. 2. 1.

- Transformação de sistema de coordenadas e unificação das folhas cartográficas.

O sistema de coordenadas adotadas por Cuba é o Cônico Conforme de Lambert, com o datum Clark 1926, subdivido em Cuba-Norte e Cuba-Sul, tornando difícil a unificação dos dados. Visando a posterior padronização, procedeu-se à transformação em coordenadas UTM e unificação das folhas cartográficas “Ciego de Avila”, “Camaguey” e “Las Tunas”.

A metodologia de trabalho consistiu, primeiramente, na seleção das coordenadas geográficas (lat-long) para cada uma das três folhas cartográficas na escala de 1:250.000, que constituem a área de estudo. Posteriormente, foi realizada a transformação para o sistema de coordenadas UTM-Norte (zona 17 Oeste), empregando o programa TELEMAT, confeccionado pelo Instituto Cubano de Geodésica e Cartografia.

A unificação das folhas cartográficas foi realizada a partir da metodologia de criação de “mosaicos” empregando o programa ER-Mapper.

- Confeção do modelo digital de terreno (MDT)

Com o objetivo de relacionar a topografia à resposta gamaespectrométrica na área de estudo, foi confeccionado o MDT. Para isso, foram inicialmente digitalizadas e unificadas as cotas topográficas correspondente às folhas “Ciego de Avila”, “Camaguey” e “Las Tunas” na escala de 1:250.000, as quais foram posteriormente convertidas em arquivos x, y, z e interpoladas.

- Interpolação em malha regular

O ordenamento dos dados em forma de malhas, com os pontos espaçados a determinada distância foi realizado conforme o exposto no epígrafe 3. 2. 2. 1.

- Micro-nivelamento

Segundo Green (1987), dados gamaespectrométricos (principalmente urânio) interpolados, em geral apresentam uma tendenciosidades na direção das linhas de vôo. Uma das formas de minimizar este problema é a través do micro-nivelamento realizado sincronicamente ao levantamento aerogeofísico, que consiste no nivelamento das medições nas linhas de vôo a partir das transversais (controle).

Minty (1991) sugeriu um método alternativo para redução dessas tendências aplicando filtros direcionais (espaciais). O método consiste em: a) passar um filtro passa-baixa (no mínimo duas vezes o tamanho da célula da malha) paralelo às linhas de vôo na malha interpolada com tendenciosidade (malha A), obtendo-se como resultado a malha B; b) passar um filtro passa alta (no mínimo três vezes o tamanho da célula da malha) perpendicular às linhas de vôo na malha B, dando como resultado a malha C (que contém os erros do micro-nivelamento); finalmente, a malha C é subtraída da malha A, mostrando como resultado a malha D micro-nivelada. Fraser *et al.* (1966) aplicaram com sucesso esta técnica com filtros no domínio da frequência (decorrução).

Patterson Grant & Watson (1998), levando em consideração uma minuciosa análise na aplicação dos filtros de decorrução, desenvolveram uma técnica de micro-nivelamento aplicando o filtro “B-Spline” (Inove, 1986). O método consiste em: a) aplicar aos dados interpolados (malha A) um filtro co-seno direcional de baixa potência (0.5) perpendicular à direção de vôo, de forma a obter outra malha (B) com a menor perda de sinal útil; b) a malha B é suavizada com filtro “B-Spline”, levando em consideração uma minuciosa análise da potência do mesmo, com intuito de separar as altas frequências do sinal útil, das baixas frequências do erro de nivelamento, dando como resultado a malha C; c) a malha C é subtraída da malha A (dados originais), obtendo-se a malha D, que contém os novos dados micro-nivelados.

➤ Composições coloridas

A aplicação de técnicas de falsa cor foi um importante avanço no processamento de imagens geofísicas. Duval (1985) propôs a criação dos mapas ternários ao integrar imagens gamaespectrométricas coloridas no espaço RGB ou CMYK, visando a obtenção da distribuição dos radioelementos e sua relação com unidades geológicas. Esta técnica foi testada pela primeira vez sobre os dados de Cuba Centro-Oriental por Prieto *et al.* (1999; 2000).

➤ Razões entre radioelementos

As razões entre radioelementos (Galbraith e Saunders 1983), assim como o fator “F” (Gnojek e Prichstal 1985; Pascholati 1990), podem contribuir na diferenciação de suítes graníticas e na determinação de possíveis zonas de alteração hidrotermal. Esses métodos se baseiam na premissa de que existem teores apreciáveis dos radioelementos nas rochas, suficiente para permitir um grau de diferenciação entre as mesmas.

➤ Supressão dos efeitos ambientais nos teores dos radioelementos

A cobertura é um dos principais fatores que influencia a variação do teor dos radioelementos nas rochas. Deste modo, faz-se necessária a supressão dos efeitos provocados em determinadas condições ambientais (Saunders *et al.* 1987).

Saunders *et al.* (1987; 1994; 1994) propuseram que teores de tório podem ser usados como controle litológico para definir valores ideais de potássio e urânio para cada amostra. Os efeitos litológicos e ambientais que influenciam a concentração de tório, também afetam o potássio e o urânio na medida que mudanças litológicas provocam aumentos ou diminuições simultâneas e da mesma ordem do teor nos radioelementos. Em princípio, a metodologia foi aplicada na identificação de acumulações de petróleo.

Pires (1995) define que a não correção dos dados gamaespectrométricos originais para o efeito de *background* geológico prejudica a definição adequada das zonas com alteração hidrotermal. Com a supressão do efeito provocado por variações litológicas, de tipo de solos e ambientais nos dados, é possível a identificação mais detalhada das acumulações anômalas de potássio, associadas a ocorrências de ouro e outros minerais de origem hidrotermal.

A normalização dos dados de potássio em relação ao tório suprimiria os efeitos primários das variáveis indesejáveis, isto é, valores de tório podem ser utilizados para prever potássio considerando a relação entre eles uma função linear que passa pela origem (1), onde a inclinação da reta é determinada pela razão da média dos valores observados de potássio (K_S) para a média dos valores observados de tório (Th_S) (Saunders *et al.* 1994; Pires 1995).

Para o potássio foi proposta a seguinte relação de normalização:

$$K_I = \frac{\text{media}(K_S)}{\text{media}(Th_S)} \cdot Th_S \quad (1)$$

Onde:

K_I : valor ideal de potássio definido a partir do teor de tório para o ponto de observação

O desvio dos valores reais de potássio (K_D), considerando os valores ideais calculados para cada ponto de observação, é obtido a partir da seguinte equação:

$$K_D = \frac{K_S - K_I}{K_I}$$

Ferreira (1998) e Blum (1999) aplicaram esta metodologia visando a identificação de zonas de alteração hidrotermal associadas a ouro, obtendo bons resultados.

➤ **Análise por Principais Componentes (APC)**

A APC é uma técnica apropriada no processamento de imagens multiespectrais de sensoriamento remoto. Estas apresentam geralmente um alto grau de correlação entre as bandas, sendo a principal função da técnica a determinação das características muito ou pouco correlacionáveis entre elas (Drury 1993).

A APC pode ser aplicada nas imagens gamaespectrométricas, permitindo discriminar o grau de correlação ou não entre os radioelementos e, portanto, a contribuição destes na especialização radiogeoquímica numa região (Harris *et al.* 1986; Martini 1995; Roig *et al.* 1998).

➤ **Análise estatística do comportamento das variáveis CT, K, Th e U em cada entidade geológica**

Com o objetivo de conhecer a resposta das concentrações dos elementos radioativos em cada entidade geológica, foi realizada uma análise estatística do comportamento das variáveis CT, K, Th e U, nas formações geológicas da área de estudo.

5. 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

5. 3. 1. Resultados

➤ **Relação da resposta gamaespectrométrica com a topografia e a drenagem na área de estudo.**

A resposta gamaespectrométrica numa determinada área depende de fatores como relevo e drenagem (Dickson e Scott 1997). A Figura 5.1 mostra o modelo digital de terreno com a drenagem para a área de estudo. Nota-se de forma geral, um relevo quase plano com pouco

desenvolvimento da drenagem, fatores estes que influenciam a resposta gamaespectrométrica no setor. Levando em consideração este fato, a resposta obtida dos radioelementos pode ser considerada *in situ*, com exceção das áreas localizadas entre as cotas de 0 e 21 m e ao longo das drenagens, onde a resposta está vinculada à re-deposição de material transportado.

➤ Interpolação em malha regular

Os dados gamaespectrométricos foram interpolados a partir da Krigagem linear com célula de 250 m (ver item 3. 3. 1. 1).

➤ Micro-nivelamento

O tratamento aos dados foi realizado seguindo a metodologia desenvolvida por Paterson Grant e Watson (1998), descrita no item 5. 2. 2. 1. Para cada radioelemento foi testada a potência do filtro “B-Spline”, de forma a obter a menor perda de sinal útil, tomando-se ainda o cuidado de controlar os parâmetros estatísticos da malha nivelada, para que não diferissem muito dos originais. A seguir serão mostrados estes resultados:

Tabela 5. 1. Resultados estatísticos das malhas originais e micro-niveladas dos elementos gamaespectrométricos.

Radio elemento	Potência do filtro “B-Spline”	Malha original				Malha Micro - nivelada			
		Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio padrão
urânio	0.83	0.1	15.6	1.65	1.0	0.1	15.9	1.8	1.1
tório	0.75	0.2	18.5	2.5	2.4	0.1	18.5	2.5	2.2
potássio	0.65	0.1	6.5	0.72	0.55	0.1	6.9	1.2	0.6

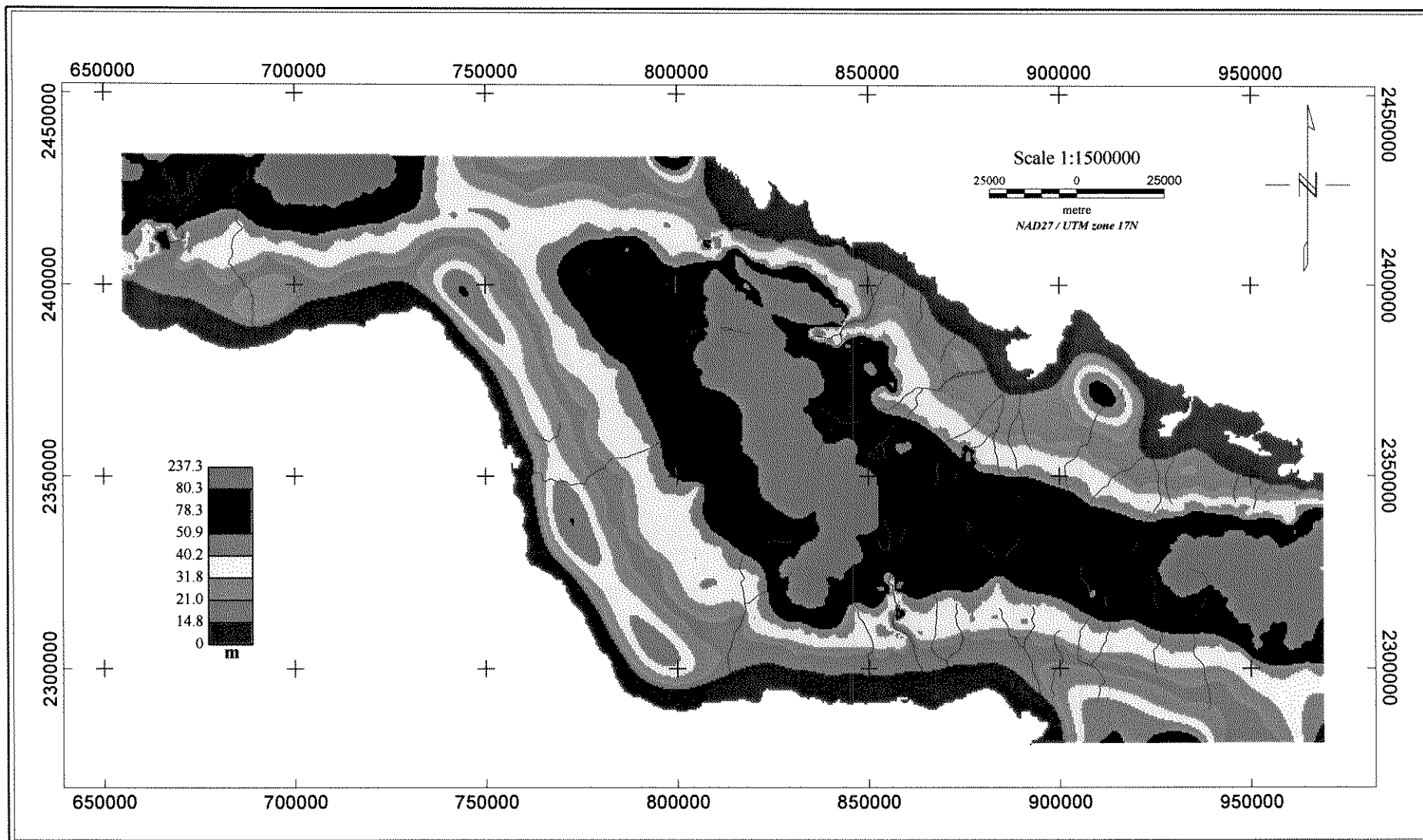


Figura 5. 1. Modelo digital de terreno com drenagem, Cuba Centro-Oriental.

➤ Composições coloridas

(I) Mapa de contagem total ($\mu\text{R/h}$)

O mapa de contagem total (Figura 5. 2) mostra um campo variável com valores baixos, próximo ao *background*, ($0.8 \mu\text{R/h}$), até máximos, ($15.4 \mu\text{R/h}$). A maior contribuição do campo gamaespectrométrico no setor ocorre nas porções norte, centro-oeste e leste, com intensidades que vão desde elevadas, $4.2 \mu\text{R/h}$, até anômalas, $6.8 \mu\text{R/h}$ (Tripp 1948).

(II) Mapa de concentração de urânio (ppm)

No mapa de concentrações de urânio (Figura 5. 3), observam-se valores relacionados ao *background*, 0.5 ppm. Setores com intensidades acima de 1.8 ppm, até anômalas, 4.0 ppm, encontram-se a norte, sul, centro-oeste e centro-leste da área. É importante salientar que, apesar da execução do micro-nivelamento nos dados, ainda persiste certa tendenciosidade de direção N-S (direção de vôo), a qual não será levada em consideração na interpretação dos resultados.

(III) Mapa de concentrações de tório (ppm)

Na Figura 5. 4, correspondente ao mapa de Tório, observam-se uniformemente por todo o setor, concentrações de *background* (1.0 ppm), até elevadas (> 2.5 ppm). Concentrações anômalas (7.0 ppm), são observadas principalmente na porção noroeste e sul.

(IV) Mapa de concentração de potássio (K)

O mapa de concentração de Potássio (Figura 5. 5) mostra uma assinatura similar ao de contagem total (Figura 5. 2). Apresenta os menores níveis de radiação entre 0.2 % - 1.2 %, principalmente na porção oeste do setor, estando, no centro-leste, os setores que apresentam maiores intensidades, com valores que vão de 1.2 % até máximos de 6.9 %. Estes últimos, de forma geral, mostram-se em extensas áreas de direção NW-SE.

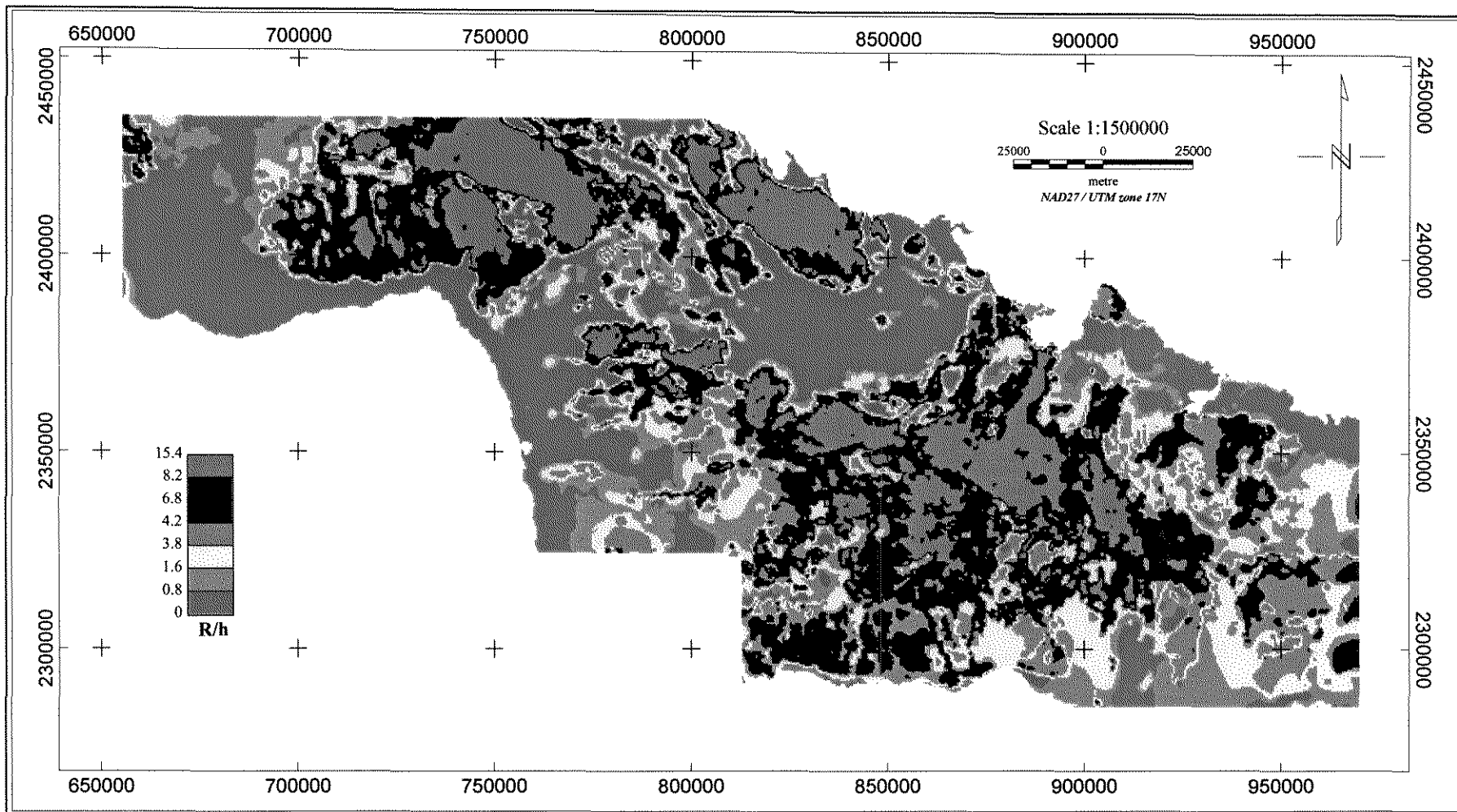


Figura 5. 2. Mapa de contagem total (R/h), Cuba Centro-Oriental.

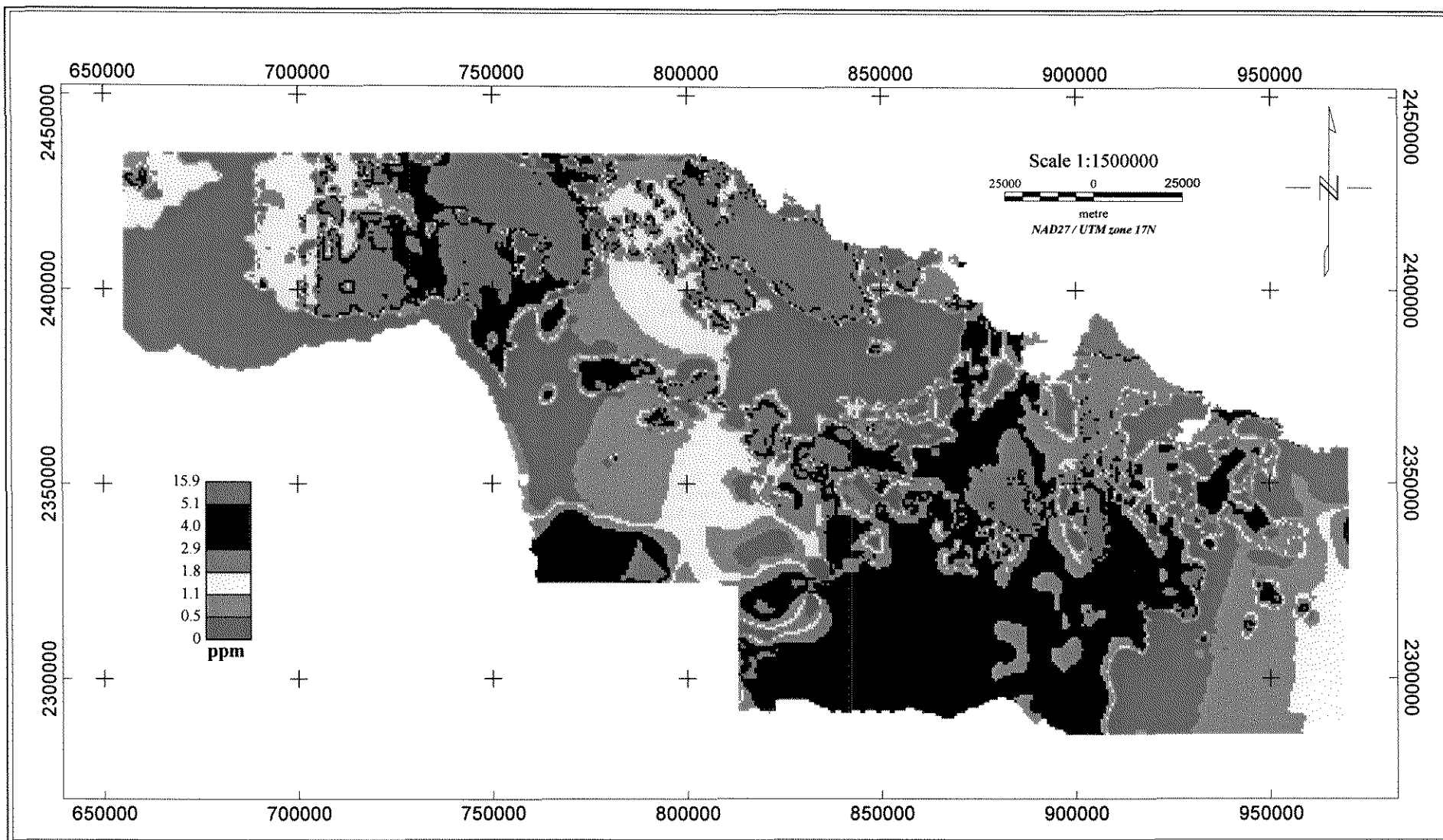


Figura 5. 3. Mapa de concentrações de urânio (ppm), Cuba Centro-Oriental.

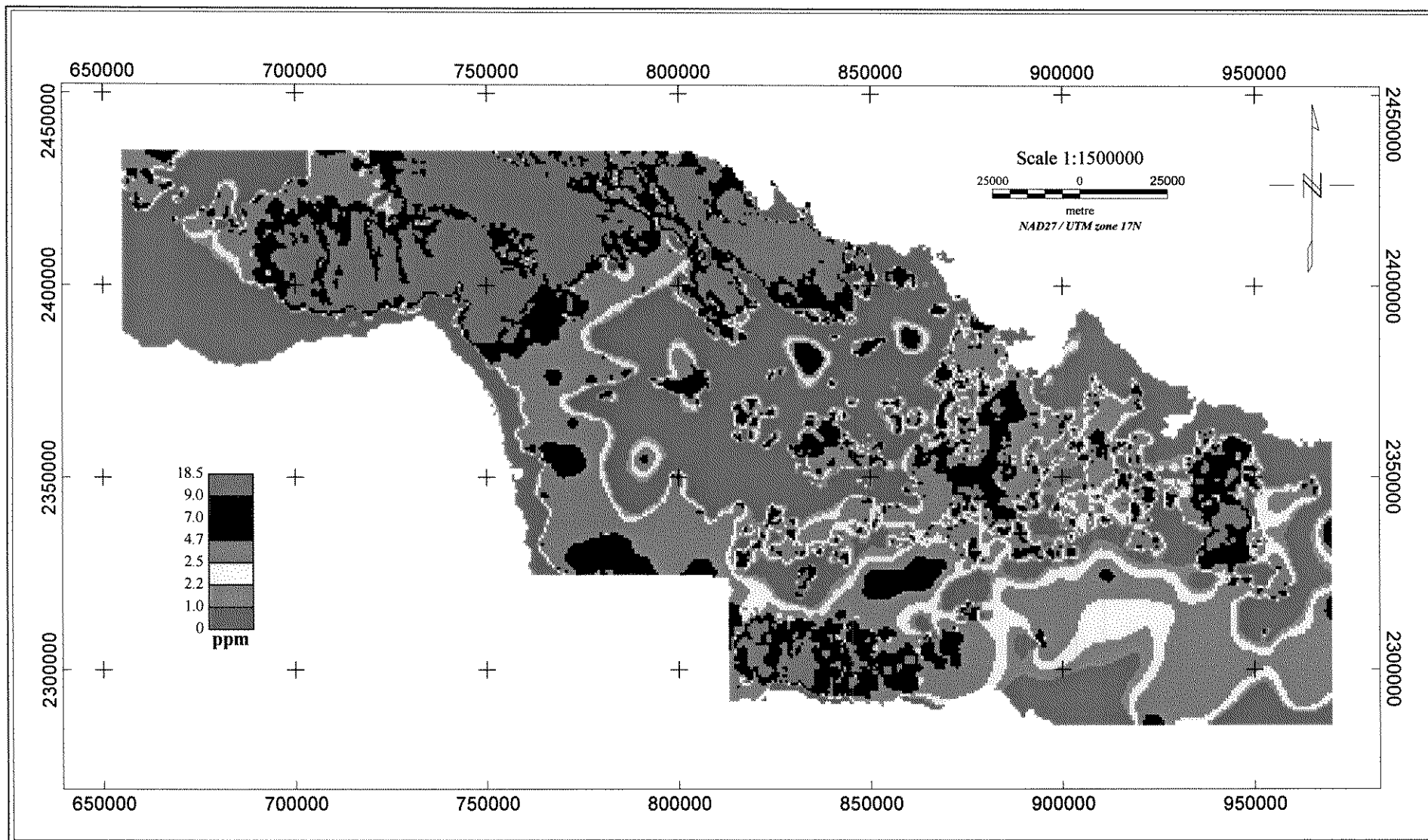


Figura 5. 4. Mapa de concentrações de tório (ppm), Cuba Centro-Oriental.

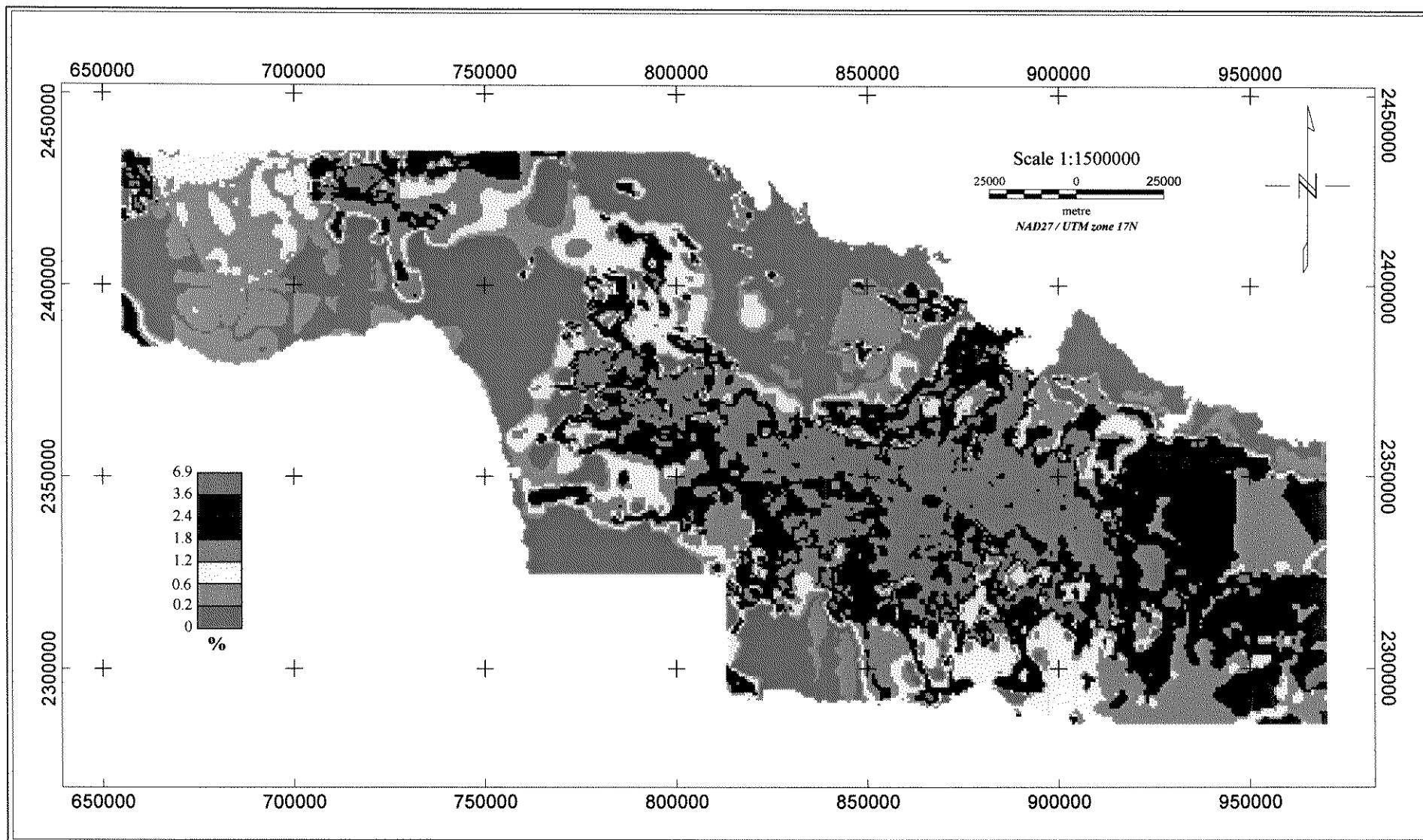


Figura 5. 5. Mapa de concentrações de potássio (%), Cuba Centro-Oriental.

(V) Mapa ternário

O resultado da aplicação da técnica nos dados foi obtida no espaço de cor RGB (Duval 1985), com o radioelemento potássio no espaço correspondente a vermelho, tório verde e urânio azul (Figura 5. 6). Os resultados mostram uma distribuição das concentrações de potássio por todo o setor, estando as maiores intensidades distribuídas principalmente na porção central, numa faixa alongada de direção NW-SE. Os radioelementos urânio e tório geralmente aparecem coincidentes nas porções norte, centro-oeste e sul do setor, destacando-se as maiores concentrações simultâneas dos três elementos ao longo da porção central do setor, numa extensa área desde norte até sul, de direção NW-SE.

➤ Razões entre radioelementos

A técnica de razões é eficaz na medida em que os radioelementos apresentem teores relativamente altos entre si. Na área de estudo, devido aos baixos teores, a aplicação desta técnica não mostrou resultados importantes.

➤ Supressão dos efeitos ambientais nos teores dos radioelementos

Aplicação da técnica de normalização dos teores de potássio à partir do tório na área de estudo forneceu como resultado o mapa de potássio normalizado (Figura 5. 7), cujo objetivo foi mostrar o antagonismo radio-geoquímico entre os radioelementos tório-potásio (Ostrovsky 1975) e a especialização radio-geoquímica do setor (Portnov 1987). Observa-se por toda a área um campo uniforme de valores baixos, como evidência do equilíbrio nos teores dos radioelementos tório e potássio. Os incrementos de potássio encontram-se na porção centro-leste do setor, espalhados numa ampla região de direção NW-SE, enquanto os de tório estão bem localizados em extensas área nas porções norte, centro-oeste e sul do setor.

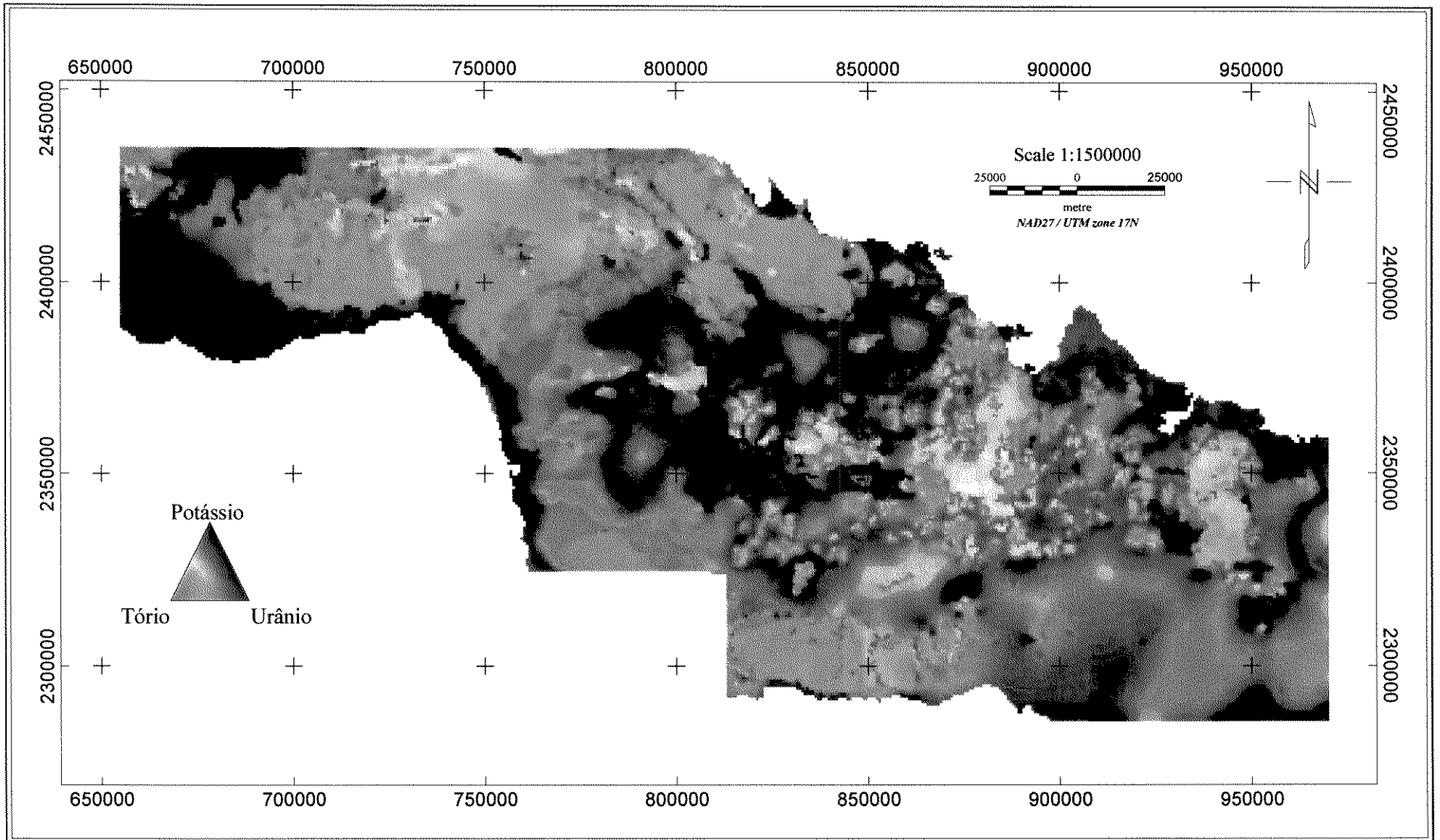


Figura 5. 6. Mapa ternário (RGB), de Cuba Centro-Oriental.

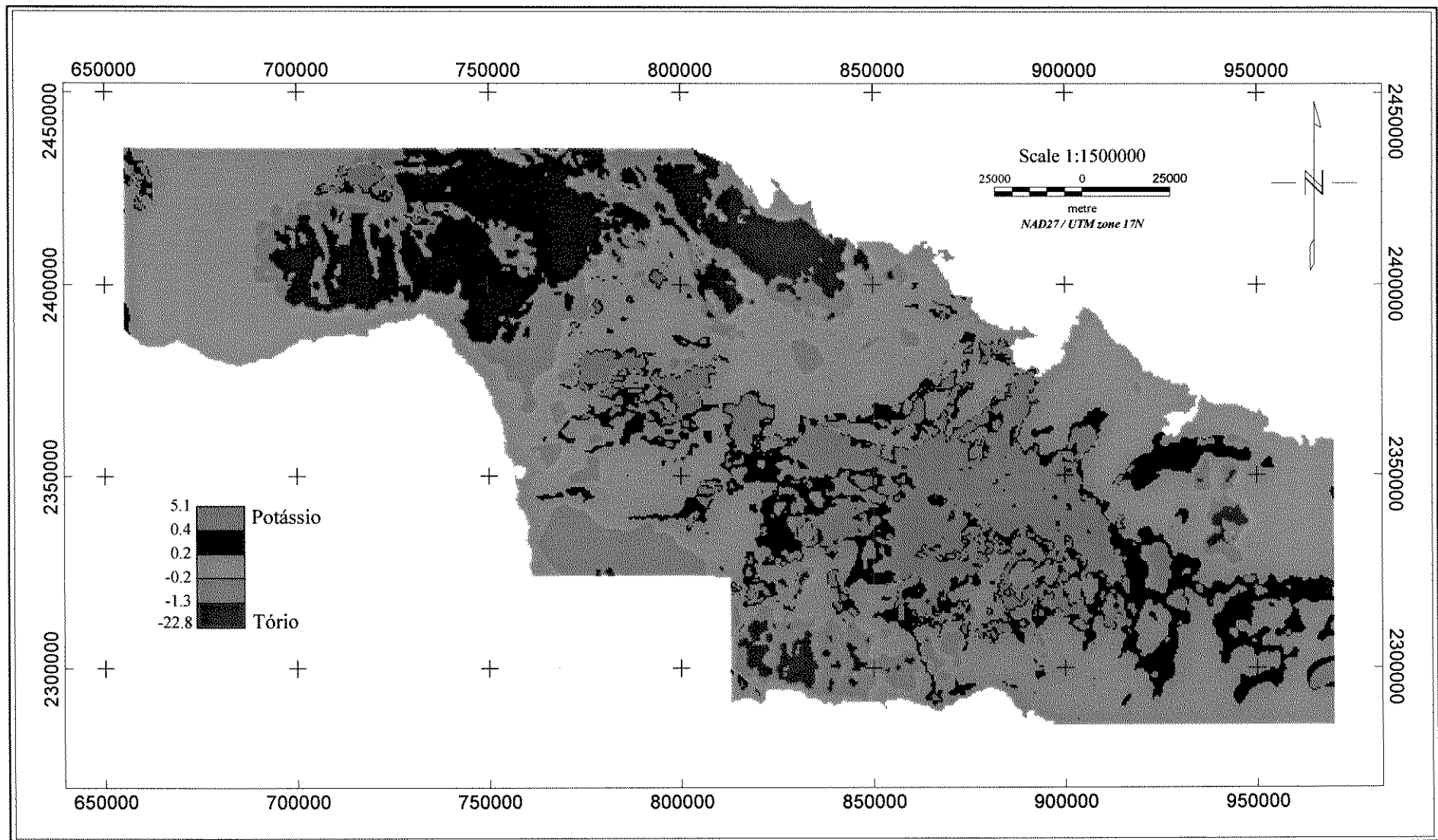


Figura 5. 7. Mapa de potássio normalizado, Cuba Centro-Oriental.

➤ **Análise por principais componentes (PC)**

A aplicação da técnica teve como objetivo a análise dos autovetores (Tabela 5. 2) e autovalores (Tabela 5.3), para obter a contribuição de cada banda (CT, K, Th e U) na formação de cada principal componente.

Tabela 5. 2. Auto-vetores obtidos por principais componentes de contagem total (CT), potássio (K), tório (Th) e urânio (U).

	PC1	PC2	PC3	PC4
contagem total (CT)	0.61	-0.25	0.07	0.75
potássio (K)	0.20	-0.84	0.20	-0.47
tório (Th)	0.50	0.46	0.67	-0.31
urânio (U)	0.58	0.17	-0.71	-0.36

Tabela 5. 3. Auto-vetores em porcentagem obtidos por principais componentes de contagem total (Ct), potássio (K), tório (Th) e urânio (U).

	PC1 (%)	PC2 (%)	PC3 (%)	PC4 (%)
contagem total (CT)	32.3	14.3	4.2	39.7
potássio (K)	10.6	48.3	12.2	24.9
tório (Th)	26.5	26.7	40.6	16.4
urânio (U)	30.7	9.8	43.0	19.1

A informação da primeira principal componente (PC1), mostra que a maior contribuição é fornecida pelo canal de contagem total, seguida dos canais de urânio e tório (Tabelas 5. 2; 5. 3). Na Figura 5. 8 observa-se que as feições da PC1 são similares às apresentadas pela contagem total (Figura 5. 2).

A segunda principal componente (PC2) é dominada por informações provenientes do canal de potássio (sinal negativo), e em menor grau, dois canais tório e contagem total (Tabelas 5. 2; 5. 3). As características mostradas na Figura 5. 9, imagem da PC2, são similares às observadas no mapa de concentrações de potássio (Figura 5. 5), nos níveis de intensidades elevadas até anômalas.

A terceira principal componente (PC3) apresenta a maior contribuição relacionada ao canal de urânio (sinal negativo), seguida de tório (Tabelas 5. 2; 5. 3). Na Figura 5. 10 observa-se a resposta da contribuição desta PC, destacando-se os valores mais intensos nas áreas relacionadas aos valores elevados até anômalos de concentrações de urânio e tório (Figura 5. 3).

Como pode ser observado na Figura 5. 11, a PC4 fornece mais o ruído, sendo dominado fundamentalmente pelo canal de contagem total.

- Análise estatística do comportamento das variáveis Ct, K, Th e U em cada entidade geológica e avaliação do seu potencial discriminador.

A seguir, nas Tabelas 5. 4 e 5. 5, serão apresentados os resultados estatísticos das variáveis CT, K, e Th, U, para cada entidade geológica do setor. O agrupamento das formações foi realizado cronologicamente, por exemplo K₂m, (cretáceo médio maestrichtiano). Foram mantidos fora desse agrupamento os complexos plutônicos e os ofiolitos.

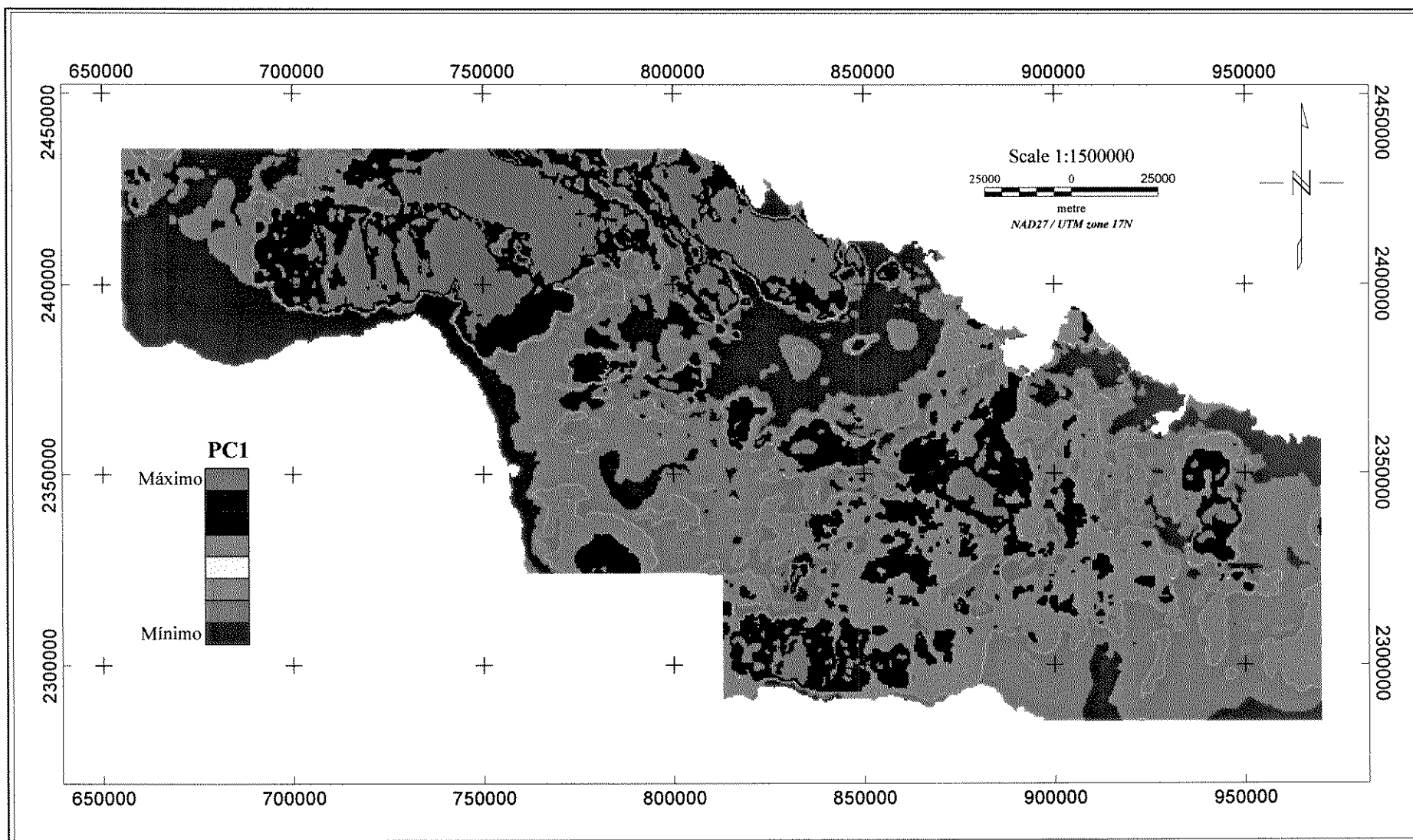


Figura 5. 8. Mapa de primeira principal componente gamaespectrométrica, Cuba Centro-Oriental.

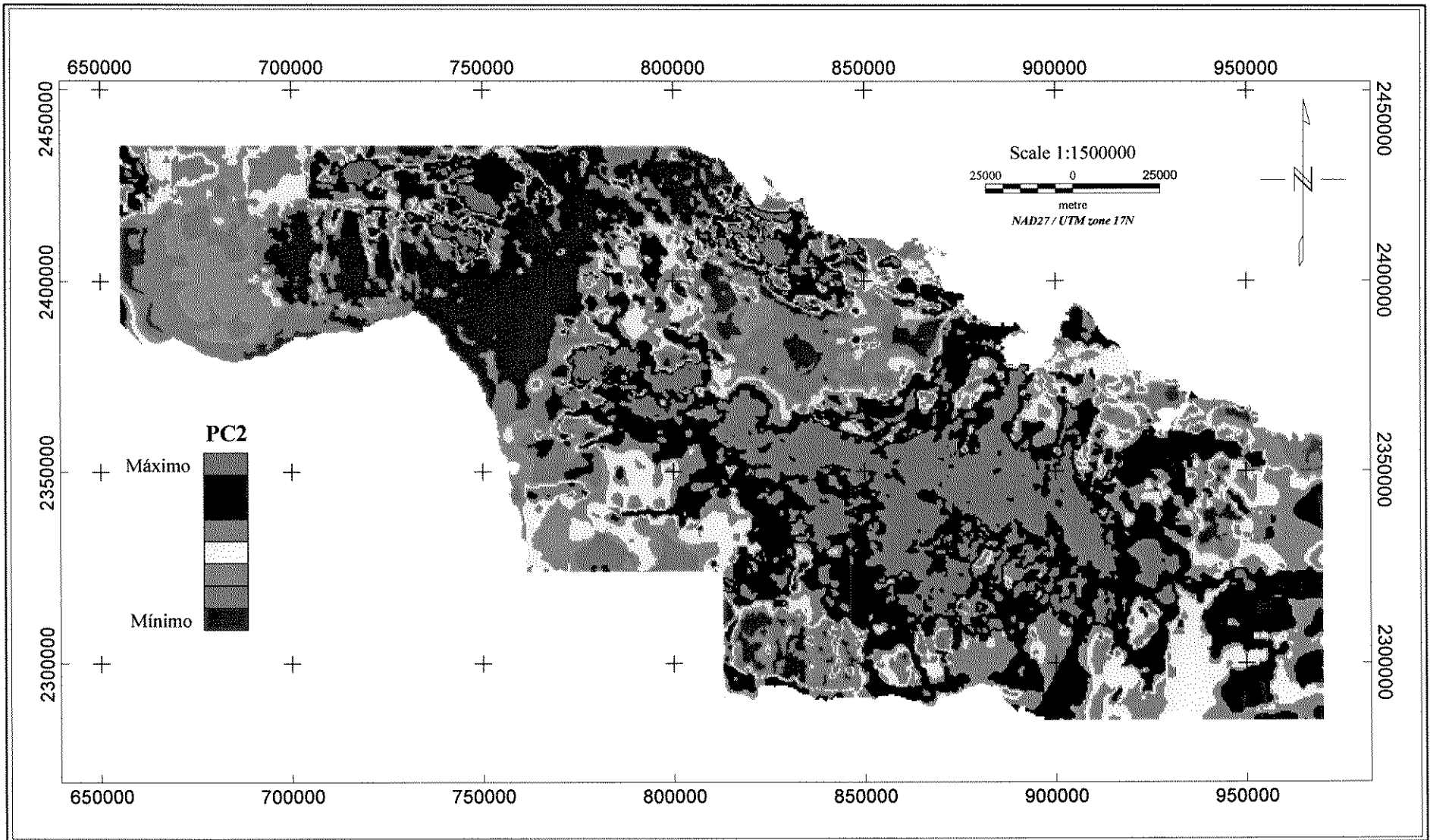


Figura 5. 9. Mapa de segunda principal componente gamaespectrométrica, Cuba Centro-Oriental.

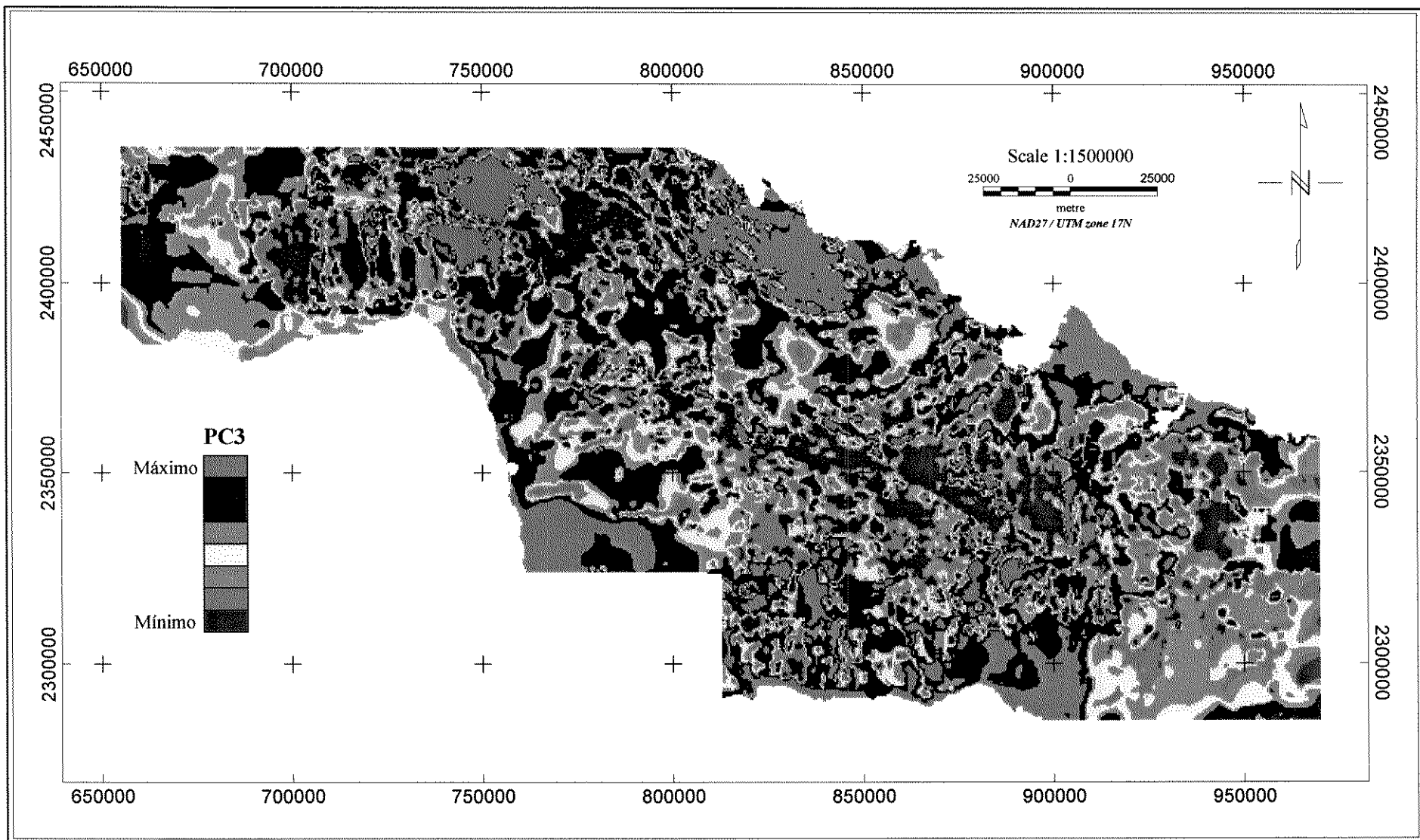


Figura 5. 10. Mapa de terceira principal componente gamaespectrométrica, Cuba Centro-Oriental.

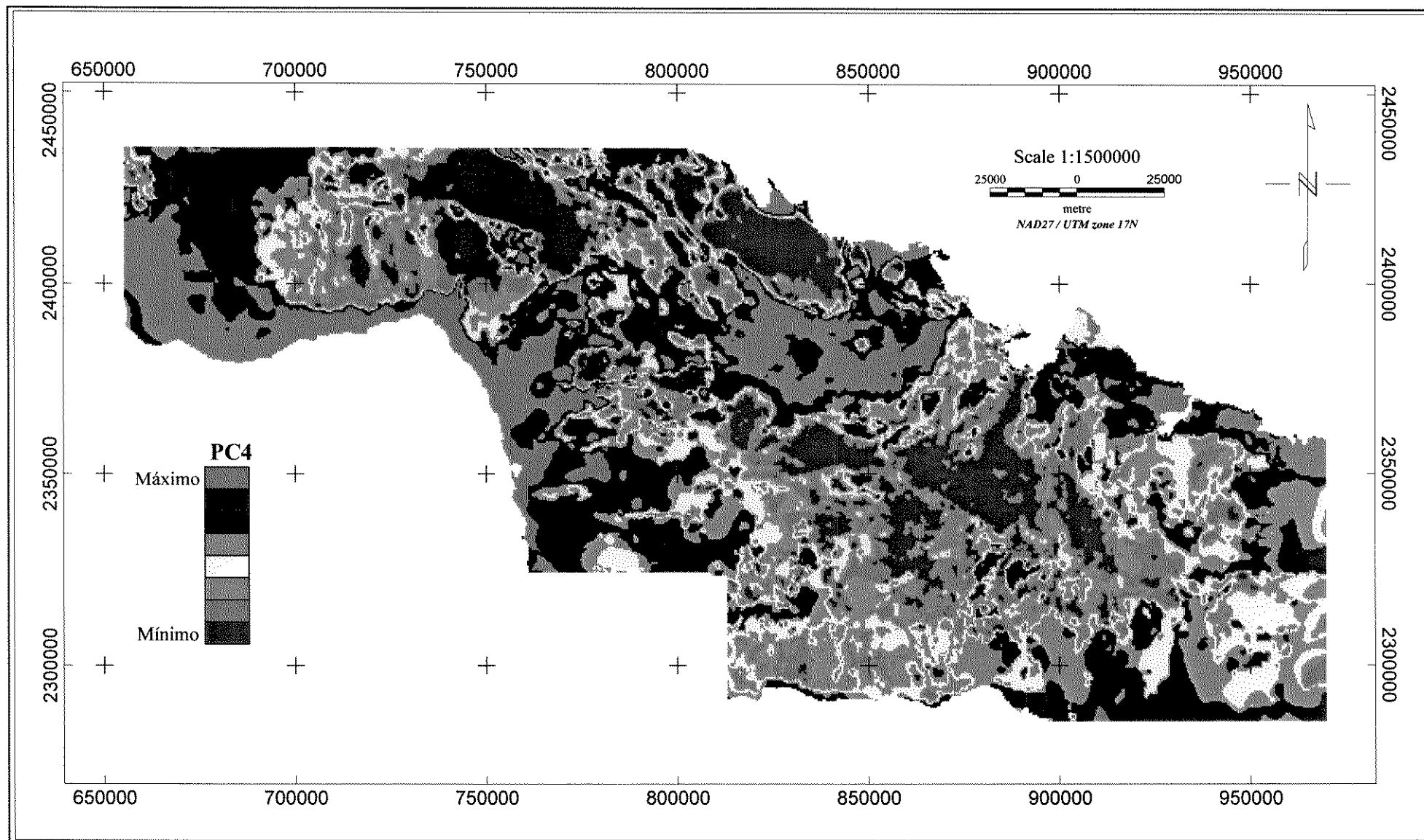


Figura 5. 11. Mapa de cuarta principal componente gamaespectrométrica, Cuba Centro-Oriental.

Tabela 5. 4. Estatística das variáveis contagem total (Ct) e potássio (K) nas entidades geológicas.

Escala do Tempo	contagem		total ($\mu\text{R/h}$)		Potássio (%)			Mediana	Desvio padrão	Entidades Geológicas
	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Média			
QUATERNÁRIO										
Holoceno (Q ₄)	0.8	13.3	2.6	1.4	0.3	2.7	0.8	0.7	0.3	Depósitos aluviais: limos argilosos e arenosos, pantanal.
Pleistoceno (Q ₂)	0.9	15.3	3.3	1.5	0.4	5.0	0.9	0.7	0.4	Depósitos aluviais, coluviais: argilas, areias.
NEOGENO										
Mioceno-Plioceno (N ₁₋₂)	1.2	11.3	4.8	1.6	0	4.2	0.8	0.7	0.2	Calcários biogênicos, detríticos e dolomíticos.
Plioceno (N ₁)	1.4	11.4	3.3	1.0	0.3	4.7	1.0	1.0	0.3	Calcários, margas, argilas, conglomerados.
PALEOGENO										
P	1.4	11.4	3.2	1.1	0.3	4.5	1.0	0.9	0.4	Conglomerados, argilas, calcários, margas, arenitos.
CRETÁCEO										
Superior Maestrichtiano (K _{2 m})	1.5	5.3	3.1	0.6	0.4	2.3	1.0	1.0	0.3	Calcários biogênicos, margas, arenitos.
Superior Campaniano-Maestrichtiano (K _{2 cp-m})	1.4	10.39	3.8	1.1	0.4	4.5	1.4	1.2	0.6	Arenitos, conglomerados vulcânicos.

Continuação Tabela 5. 4.

Escala do Tempo	contagem		total ($\mu R/h$)		potássio (%)					Entidades Geológicas
	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	
CRETÁCEO										
Superior Campaniano (K_2 cp)	1.2	13.9	3.7	1.4	0.3	6.1	1.5	1.4	0.7	Calcários, andesitos, tufos intermediários-ácidos.
Superior Cenomaniano-Campaniano (K_2 cn-cp)	2.0	8.1	4.0	0.7	0.5	4.3	1.5	1.5	0.4	Arenitos, lavas e tufos andesito-basálticos.
Inferior Alvinho-Turoniano (K_{1-2} al-t)	2.1	9.6	4.3	1.0	0.3	5.0	1.7	1.7	0.6	Lavas e tufos andesito-basálticos, calcários, arenitos.
Inferior-Superior indiferenciado (K_{1-2})	1.3	15.0	4.1	2.2	0.5	2.1	0.8	0.7	0.2	Calcários biogênicos, dolomitos, margas.
Inferior Aptiano-Alviano K_1 a-al	2.1	5.3	3.2	0.7	0.5	2.2	1.2	1.0	0.3	Tufos e lavas intermediária-básica, basaltos, andesitos, calcários.
GRANITÓIDES (K_2)	1.3	13.6	4.8	1.7	0.2	6.9	2.0	1.9	0.8	Granodioritos, quartzodioritos.
GRANITOS (K_2)	2.1	14.3	7.4	3.2	0.4	6.5	3.3	2.9	1.9	Granitos
SIENITOS (K_2)	2.8	12.0	5.9	1.5	1.0	6.4	2.7	2.4	0.9	Sienitos.
OFIOLITOS	1.5	6.4	2.6	0.8	0.5	2.1	0.8	0.7	0.1	Serpentinitos, harzburgitos, dunitos.

Tabela 5. 5. Estatística das variáveis tório (Th) e urânio (U) nas entidades geológicas.

Escala do Tempo	tório (ppm)				urânio (ppm)				Entidades Geológicas	
	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Mediana		Desvio padrão
QUATERNÁRIO										
Holoceno (Q ₄)	0	18.3	1.5	2.0	0	11.0	1.3	0.9	1.2	Depósitos aluviais: limos argilosos e arenosos, pantanal. Depósitos aluviais, coluviais: argilas, areias.
Pleistoceno (Q ₂)	0	18.4	2.6	2.4	0.1	15.8	1.7	1.3	1.2	
NEOGENO										
Mioceno-Plioceno (N ₁₋₂)	0	14.3	6.4	2.8	0.1	12.1	2.8	2.1	1.7	Calcários biogênicos, detríticos e dolomíticos.
Plioceno (N ₁)	0.1	18.4	2.6	2.3	0.2	11.6	1.5	1.3	0.8	Calcários, margas, argilas, conglomerados.
PALEOGENO										
P	0	18.5	2.1	1.9	0.4	10.8	1.6	1.3	0.9	Conglomerados, argilas, calcários, margas, arenitos.
CRETÁCEO										
Superior Maestrichtiano (K ₂ m)	0	8.1	1.7	1.0	0.2	2.4	1.4	1.3	0.3	Calcários biogênicos, margas, arenitos.
Superior Campaniano-Maestrichtiano (K ₂ cp-m)	0.3	5.4	1.6	0.6	0.6	4.5	1.7	1.8	0.5	Arenitos, conglomerados vulcânicos.

Continuação Tabela 5. 5.

Escala do Tempo	tório (ppm)				urânio (ppm)					Entidades Geológicas
	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Desvio padrão	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Mediana	Desvio padrão	
Cretáceo										
Superior Campaniano (K ₂ cp)	0	10.3	1.4	0.7	0.3	6.0	1.5	1.3	0.6	Calcários, andesitos, tufo intermediários-ácidos.
Superior Cenomaniano-Campaniano (K ₂ cn-cp)	0	7.7	1.6	0.4	0.2	4.3	1.5	1.3	0.6	Arenitos, lavas e tufo andesito-basálticos.
Inferior Alviao-Turoniano (K ₁₋₂ al-t)	0	4.4	1.6	0.4	1.0	4.1	1.8	1.8	0.3	Lavas e tufo andesito-basálticos, calcários, arenitos.
Inferior-Superior indiferenciado (K ₁₋₂)	0	18.3	3.8	3.5	0.4	15.4	2.6	1.6	2.3	Calcários biogênicos, dolomitos, margas.
Inferior Aptiano-Alviano K ₁ a-al	0.8	4.1	1.6	0.6	0.8	2.0	1.3	1.3	0.1	Tufo e lavas intermediária-básica, basaltos, andesitos, calcários.
GRANITÓIDES (K ₂)	0.1	9.4	1.7	0.8	0.5	6.0	1.9	1.8	0.8	Granodioritos, quartzodioritos.
GRANITOS (K ₂)	1.1	9.2	2.5	1.3	0.5	6.3	2.6	2.0	1.2	Granitos
SIENITOS (K ₂)	0.9	5.8	1.9	0.6	0.5	5.3	1.9	1.8	0.6	Sienitos.
OFIOLITOS	0	12.1	1.9	1.8	0.4	2.7	1.12	0.8	0.5	Serpentinitos, harzburgitos, dunitos.

5. 3. 2. Discussão

A discussão dos resultados gamaespectrométricos foi realizada com base na integração dos mapas dos radioelementos e processados, com os diferentes complexos geológicos no setor.

Na Figura 5. 3, correspondente ao mapa de concentrações de urânio, destaca-se de forma geral, três áreas com valores anômalos que definem a contribuição do radioelemento no setor. A primeira, a oeste e sul, estão representadas por amplas zonas de cobertura cenozóica neo-autóctonas (N_{1-2} , N_1), constituídas fundamentalmente por calcários de variada composição, às vezes biogênicos (Tabela 5. 5). A contribuição de urânio pode estar associada à presença do radioelemento nos calcários neogênicos (ver Figura. 2. 5), ao ser substituído o cálcio pelo urânio (u^{+4}) no retículo cristalino da rocha (Dickson e Scott 1997). A segunda área, a norte, é constituída por calcários massivos e alterados, paleocênicos e cretácicos (K_{1-2}), pertencentes a sedimentos continentais da margem continental das Bahamas (zona Remédios), sendo os incrementos de urânio possivelmente relacionados a enriquecimento de fosfato nos calcários (ver Figura. 2. 5, Tabela 5. 5). No perfil radiométrico realizado nessa área, com o objetivo de verificar a natureza das anomalias de urânio (Figura. 5. 12), pode-se observar o incremento da contagem total sobre os calcários fosfatados (Figuras 5. 12; 5. 13 e 5. 14). A terceira área de maior contribuição no setor encontra-se na porção central do mesmo. Nela destaca-se uma faixa alongada de zonas anômalas de direção NW-SE e rumo de $\sim 45^0$, coincidente com o eixo de afloramentos de corpos plutônicos do arco vulcânico cretáceo (ver item 2. 2. 2, Figura 2. 3) vinculados à falha “Cubana Axial” (ver item 2. 2. 3). A contribuição de urânio nesta faixa pode estar relacionada à presença de granitóides (Marí 1997; Pérez e Sukar 1997).

O radioelemento tório, de forma similar ao urânio, apresenta a maior contribuição em áreas localizadas nas porções norte, sul e oeste da área de estudo (Figura 5. 4). Nas áreas oeste e sul, o Th ocorre associado à coberturas cenozóicas (N_{1-2} , N_1) e, a norte, à sedimentos continentais (P, K_{1-2}) pertencentes a zona Remédios (ver tabela 5. 5) (Díaz *et al.* 1997), onde o enriquecimento de tório pode estar relacionado à presença de crostas lateríticas formadas sob ação do intemperismo (Figuras 5. 15; 5. 16) fato comum em climas tropicais (Grant 1985; Dickson e Scott 1997).

A maior contribuição de potássio (Figura 5. 5) encontra-se de norte a sul na porção central do setor. Esta extensa área alongada, de direção NW-SE, está localizada no setor de maior

desenvolvimento dos complexos vulcano-plutônicos do Arco Cretácico. Nela, as concentrações de potássio podem estar associadas à presença de rochas plutônicas pertencentes às séries calco-alcalina normal e alcalina, constituídas, localmente, por sienitos com altos teores de K_2O , muito intemperizados (Tabela 5. 4, Figura 5. 17) (Marí 1997; Pérez e Sukar 1997) e aos complexos vulcano-sedimentares do arco (K_2 cp-m, K_2 cp, K_2 cn-cp, K_{1-2} al-t), representados por seqüências de lavas e corpos sub-vulcânicos (Tabela 5. 3, Figura 5. 18) (Piñero *et al.* 1997). O quadro geoquímico regional anteriormente exposto é representativo de series magmáticas relacionadas a arcos de ilhas, a exemplo do Arco Indonésio (Hoogerwerff *et al.* 1997).

Os resultados obtidos no mapa ternário (Figura 5. 6) reforçam o já discutido anteriormente, a partir da resposta dos radioelementos potássio, tório e urânio. Nas porções norte, sul e oeste da área de estudo, são observados setores de cor azulada produto da presença de valores anômalos de tório e urânio em sedimentos plataformais e recentes (neo-autóctono).

A porção central do setor destaca-se pela presença de uma faixa de cor branca, de direção NW-SE, como resposta à integração dos valores anômalos dos três radioelementos. Nesta faixa, como expresso anteriormente, afloram diferentes corpos de granitóides, constituídos pelas séries calco-alcalina normal e alcalina (Marí 1997; Pérez e Sukar 1997), possivelmente responsáveis pela contribuição destes radioelementos. O resto do setor, de forma geral, apresenta tons escuros em resposta ao baixo nível de radiação; entretanto a coloração avermelhada manifesta o predomínio da especialização radiogeoquímica de potássio das séries magmáticas de arcos cretácicos (Doglioni *et al.* 1999).

A aplicação da técnica de correção dos teores de potássio a partir do tório para a área de estudo (Figura 5. 7), mostra resultados que reforçam com clareza a especialização radiogeoquímica no setor. As regiões central e centro-leste mostram amplos setores de natureza potássica, fornecida pelo potássio como radioelemento predominante nas formações e complexos geológicos vinculados às séries magmáticas do arco vulcânico cretáceo (Marí 1997, Pérez e Sukar 1997; Piñeiro *et al.* 1997), em detrimento dos teores de tório nestas formações, como resultado do antagonismo geoquímico destes radioelementos (Ostrovski 1975). As regiões norte, sul e oeste, de natureza torífera, estão relacionadas às coberturas cenozóicas afetadas pelos intensos processos de intemperismo formadores das crostas lateríticas (Grant 1985; Dickson e Scott 1997).

A aplicação da análise por principais componentes nos dados gamaespectrométricos mostrou resultados interessantes fundamentalmente nas primeira e segunda principais componentes. Como foi explicado com anterioridade a partir dos auto-vectores obtidos nas PC (Tabelas 5. 2; 5. 3), a primeira principal componente mostra a maior contribuição oferecida pela contagem total, seguida de urânio e tório, fato observado no mapa da Figura 5. 8, onde setores associados a valores elevados e anômalos estão relacionados a norte a calcários massivos e alterados, paleocênicos e cretácicos (K_{1-2}), pertencentes a sedimentos continentais da margem continental das Bahamas (zona Remédios), a oeste e sul a zonas de cobertura cenozóica neo-autóctonas (N_{1-2} , N_1) constituídas fundamentalmente por calcários de variada composição, às vezes biogênicos (Tabela 5. 5) e a centro-leste desde norte até sul ao desenvolvimento de rochas vinculadas com o magmatismo plutônico-vulcânico do arco cretácico.

A segunda principal componente mostra a maior contribuição relacionada a potássio de sinal negativo (Tabelas 5. 2; 5. 3), onde valores elevados e anômalos a oeste e centro-leste (Figura 5. 9) estariam relacionados à presença de rochas pertencentes a magmatismo plutônico e vulcânico de variada composição, correspondente a fácies evolutivas do arco de ilha cretácico. O sinal negativo da contribuição de potássio respeito à contribuição do tório pode representar o antagonismo geoquímico destes radioelementos (Ostrovski 1975).

Segundo os resultados obtidos nas Tabelas 5. 2, e 5. 3, a maior contribuição da terceira principal componente corresponde a urânio (sinal negativo) seguida de tório, como consequência da diferença genética da fonte de aporte destes radioelementos na área de estudo. A imagem da Figura 5.10, mostra valores elevados até anômalos a norte relacionados a urânio (fosfatização) em calcários continentais da margem da Plataforma das Bahamas (zona Remédios), as restantes áreas relacionam-se fundamentalmente a tório em amplas zonas com desenvolvimento de lateritas em seqüências cenozóica (N_{1-2} , N_1).

5. 4. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos do tratamento e interpretação dos dados gamaespectrométricos em Cuba Centro-Oriental permitem chegar às seguintes conclusões:

A gamaespectrometria mostrou-se um método eficaz no mapeamento geológico da área, permitindo discernir, a partir dos radioelementos, rochas pertencentes ao substrato dobrado daquelas pertencentes a neo-autóctone.

Setores que apresentam maiores concentrações de urânio, relacionam-se a coberturas cenozóicas do neo-autóctone, sedimentos continentais fosfatados da Plataforma das Bahamas e afloramentos de corpos plutônicos do arco vulcânico cretácico.

O tório apresenta os maiores contrastes em extensas áreas relacionadas a desenvolvimento de crostas lateríticas em seqüências cenozóicas vinculadas a neo-autóctone.

O potássio mostra concentrações relacionadas a rochas do substrato dobrado, vinculadas às séries magmáticas plutônica e vulcânicas do arco vulcânico cretácico.

A integração dos radioelementos no mapa ternário mostrou que, de forma geral, existe um predomínio das concentrações de potássio sobre o tório e urânio, o que permite considerar este radioelemento como responsável pela especialização radiogeoquímica no setor.

A aplicação da técnica de normalização de potássio segundo o tório diferenciou setores com contribuição de um radioelemento em relação ao outro, mostrando setores com predomínio de potássio vinculados a rochas pertencentes a substrato dobrado, daquelas com predomínio de tório relacionadas à neo-autóctone, refletindo o antagonismo radiogeoquímico Th-K na evolução geológica do setor.

A análise por principais componentes, embora seja uma técnica aplicada a imagens multiespectrais de sensoriamento remoto, mostrou resultados interessantes no setor, destacando-se mais uma vez o potássio pela sua contribuição na segunda principal componente, como radioelemento responsável pelas características radiogeoquímicas na área.

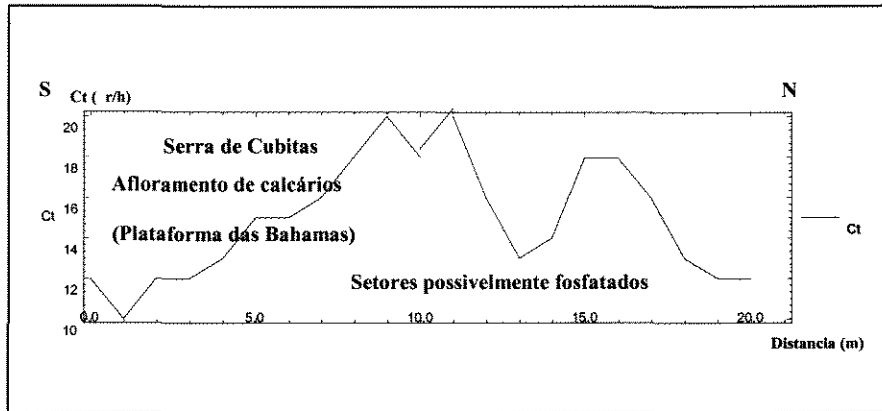


Figura 5. 12 Perfil radiométrico de verificação em calcários.



Figura 5. 13 Calcáreo maciço sem alteração



Figura 5. 14 Calcáreo alterado (possível fosfatação ?)

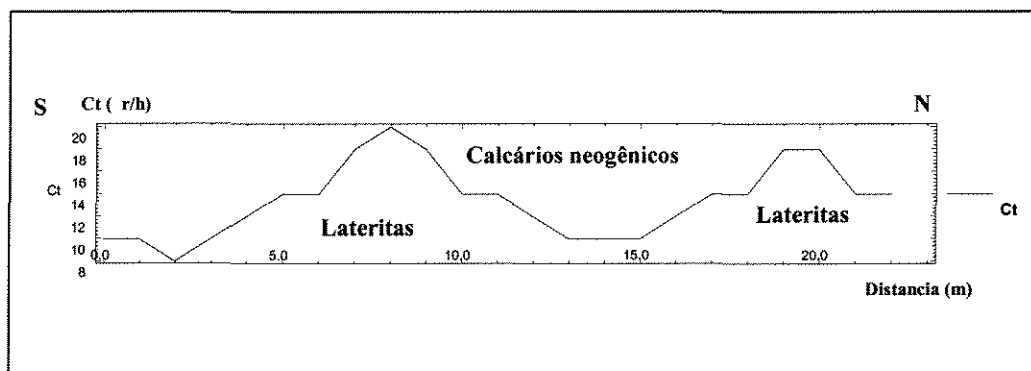


Figura 5. 15. Perfil de verificação em cobertura cenozóica.



Figura 5. 16. Cobertura cenozóica com intemperismo laterítico.



Figura 5. 17. Corpo sienítico intemperizado.



Figura 5. 18. Corpo sub-vulcânico.

5. 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Baranov, V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysyscs.* **22**, 359-383.
- Blum, M. L. B. 1999. *Processamento e Interpretação de Dados de Geofísica Aérea no Brasil Central e sua aplicação à Geologia Regional e à Prospecção Mineral*. Instituto de Geociências, Universidade de Brasília, Brasília, Tese de Doutorado, 229 p.
- Crosta, A. 1993. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*, ed. rev. Instituto de Geociências, Unicamp. São Paulo, 170 p.
- Díaz, O. C.; Furrázola, B. G.; Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Estratigrafia de la zona Remedios. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 221-242.
- Dickson, B. L. e Scott, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray survey adding the geochemical factor. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics.*, **17**: 187-200.
- Dogliani, C.; Harabaglia, P.; Merlini, S.; Mongelli, F.; Peccerillo, A.; Piromallo, C. 1999. Orogens and slab vs. their direction of subduction. *Earth-Science Review.*, **45**: 167-208.
- Drury, S. A. 1993. *Image Interpretation in Geology*, London, Allen & Urwin, 243 p.
- Duval, J. S. 1985. Composite color images of aerial gamma-ray spectrometric data. *Geophysics journal.*, **48**: 722-735.
- Ferreira, J. F. 1998. Identificação gamaespectrométrica de áreas de alteração hidrotermal na região de Peixoto de Azevedo, MT. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, *Anais*, **1**: 332-333.
- Fraser, D. C.; Fuller, B. D.; Ward, S. H. 1966. Some numerical techniques for application in mining exploration. *Geophysics.*, **31**: 1066-1077.
- Galbraith, J. H. e Saunders, D. F. 1983. Rocks classification by characteristic of gamma-ray measurement. *Journal of Geochemical Exploration.*, **18**: 49-73.
- Gnojek, I. e Prichstal, A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-rate spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration.*, **23**: 491-502.

- Grant, F. S. 1985. Aeromagnetism, geology and ore environment I. Magnetite in igneous, sedimentary and metamorphic rocks: an overview. *Geoexploration*, **23**: 303-333.
- Green, A. 1987. Leveling airborne gamma-radiation data using between-channel correlation information. *Geophysics*, **52**: 1552-1562.
- Hansen, R. O. 1993. Interpretive gridding by anisotropic kriging. *Geophysics*, **58**: 1491-1497.
- Harris, J. R.; Neily, L.; Pultz, T.; Slaney, V. R. 1986. Principal component analysis of airborne geophysical data for lithologic discrimination using an image analysis system. In: Twentieth International Symposium on Remote Sensing of environment, Nairobi, *Resumo Expandidos*, 641-648.
- Hoogewerff, J. A.; van Bergen, M. J.; Vroom, P. Z.; Hertogen, J.; Wordel, R.; Sneyers, A.; Nasution, A.; Varekamp, J. C.; Moens, H. L. E.; Mouchel, D. 1997. U-series, Sr-Nd-Pb isotope and trace-element systematics across an active island arc-continent Collisional zone: Implications for element transfer at the slab-wedge interface. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, **61**: 1057-1072.
- Inove, H. 1986. A least squares smooth filtering for irregular spaced data: finite element approach using the cubic b-spline basis. *Geophysics*, **51**: 2051-2066.
- Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Introducción a la Geología de Cuba. . In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, p.35-68.
- Liubi, L. I. e Martinova, T. V. 1982. *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC), en el territorio de la provincia de Camagüey, escala 1:50.000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).
- Mari, T. M. 1997. Particularidades de los Granitoides de Ciego de Avila-Camaguey-Las Tunas y consideraciones sobre su posición dentro del Arco de Islas. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 399-416.
- Martini, M. J. 1995. *Análise Integrada de dados aplicada ao estudo metalogênico da Serra dos Carajás, PA*. Instituto e Geociências, Universidade Estadual de Campinas, São Paulo, Dissertação de Mestrado, 125 p.

- Minty, B. R. S. 1991. Simple Micro-Leveling for Aeromagnetic Data. *Exploration Geophysics.*, **22**: 591-592.
- Ostrovski, E. Ya. 1975. Antagonism of radioactive element in wallrock alterations field and its use in aero gamma spectrometric prospecting. *International Geological Review.*, **17**: 461-468.
- Pascholati, E. M. 1990. *Caracterização geofísica da Suíte Intrusiva de Itu*, Instituto de Astronomia e Geofísica, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 135 p.
- Paterson Grant e Watson. 1998. Microleveling using FFT Decorrugation. In: Microleveling GX information: [http:// www. Pgw.on.ca/s_gxs.html](http://www.Pgw.on.ca/s_gxs.html).
- Pérez, R. M. e Sukar, S. K. 1997. Granitoides del Arco Volcánico Cretácico de la Región Central de Cuba (antigua provincia de Camaguey). In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 387-398.
- Piñero, P. E.; Quintana, M. E.; Marí, M. T. 1997. Caracterización Geológica de los depósitos vulcanógeno-sedimentarios de la región de Ciego-Camaguey-Las Tunas. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 345-356.
- Pires, A. C. B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Revista Brasileira de Geociências.*, **25**: 61-68.
- Portnov, A. M. 1987. Specialization of rocks towards potassium and thorium in relation to mineralization. *International Geology Review.*, **29**: 326-344.
- Prieto, C. R. L. e Brodovoi, R. 1986 *Informe sobre los resultados del Levantamiento Aerogeofísico Complejo (LAGC), en el sector Nuevitas-Guaimaro, escala 1:50.000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).
- Prieto, C. R. L.; Pascholati, E. M.; Amaral, G. 1999. Gamma spectrometric studies on the Cretacic Island Arc Complex in Central-East Cuba. In: SBGF, International Congress of the Brazilian Geophysical Society, 6, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 133.
- Prieto, C. R. L.; Pascholati, E. M.; Amaral, G. 2000. Procesamiento digital de imágenes gammaespectrométricas en Cuba Centro-Oriental. Técnicas y resultados. In: SCG/Núcleo Geofísica, I Congreso Internacional de Geofísica. Ciudad de La Habana.

- Puscharowski, YU. M. (eds.) 1988. *Mapa geológico de la República de Cuba a escala 1: 250.000*. Academias de Ciencias de Cuba y la Unión Soviética. 40 p.
- Ribeiro, C. E. 1993. Transformação de Dados Aerogeofísicos em Imagens Raster utilizando Mínima Curvatura. In: SBGF, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 3, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 1013-1018.
- Roig, L. H.; Meneses, L. P.; Tupinanbá, M.; Moura, P. L. P. 1998. Geophysical and image processing techniques applied to regional geological correlation: the case of Central Ribeira Belt. In: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 40, Belo Horizonte, *Anais*, 1: 390.
- Russanov, V. e Prieto, C. R. L. 1987. *Red de Apoyo Aerogeofísica Nacional, escala 1:50.000*. Ciudad de La Habana, IGP. (Relatório técnico-econômico).
- Saunders, D. F.; Terry, S. A.; Thompson, C. K. 1987. Test of uranium resource evaluation gamma-ray spectral data in petroleum reconnaissance. *Geophysics.*, **52**: 1547-1556.
- Saunders, D. F.; Burson, K. R.; Branch, J. F. 1993. Relation of thorium-normalized surface and aerial radiometric data to subsurface petroleum accumulations. *Geophysics.*, **50**: 1417-1427.
- Saunders, D. F.; Branch, J. F.; Thompson, C. K. 1994. Test of Australian aerial radiometric data for use in petroleum reconnaissance. *Geophysics.*, **59**: 1547-1556.
- Stevanato, R.; Ferreira, F. J.; Soares, P. C. 1995. Desempenho de métodos de interpolação espacial na composição de mapas aerogeofísicos. In: SBGF, Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica, 4, Rio de Janeiro, *Resumos Expandidos*, 252-255.
- Tripp, R. M. 1948. Is it an anomaly?. *Geophysics.*, **13**: 443-451.

Capítulo 6. MODELAGEM 2-D DE DADOS GRAVIMÉTRICOS E AEROMAGNÉTICOS

6. 1. INTRODUÇÃO

A modelagem 2-D de dados gravimétricos e aeromagnéticos (método direto iterativo), compreende a criação de um modelo inicial, calculado com base no comportamento geológico-geofísico das fontes responsáveis pelas anomalias geofísicas, e a comparação dos parâmetros da anomalia calculada com aqueles da anomalia observada, para posterior ajuste (Blakely 1996). O modelo 2-D estima as anomalias como “lineares”, ao ter sua propriedade invariante ao longo de seu comprimento, considerando-as como produzidas por corpos “bidimensionais”, tais como falhas, diques e contatos litológicos (Talwani *et al.* 1959).

A importância de realizar a modelagem dos dados e conhecer os parâmetros físicos causadores das fontes anômalas que a provocam parte da solução da ambigüidade geológico-geofísica, isto é, propriedades equivalentes nas rochas podem ser produzidas por mais de uma resposta geológica (Reynolds 1997). Isto pode ser exemplificado semelhança na resposta anômala obtida na presença de rochas félsicas de variada composição, como granitos, granodioritos e quartzo-dioritos (Blakely 1996).

Neste capítulo, é apresentada a modelagem dos dados gravimétricos e aeromagnéticos da área de estudo, conduzida com intuito de se obter os parâmetros físicos causadores das fontes anômalas.

6. 2. MATERIAIS E MÉTODOS

6. 2. 1. Materiais

A modelagem 2-D na área de estudo foi realizada empregando-se os seguintes materiais:

- 1- mapa geológico da área de estudo (Figura 6.1);
- 2- mapa residual do campo magnético anômalo (Figura 6. 2);
- 3- mapa residual do campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) (Figura 6. 3);

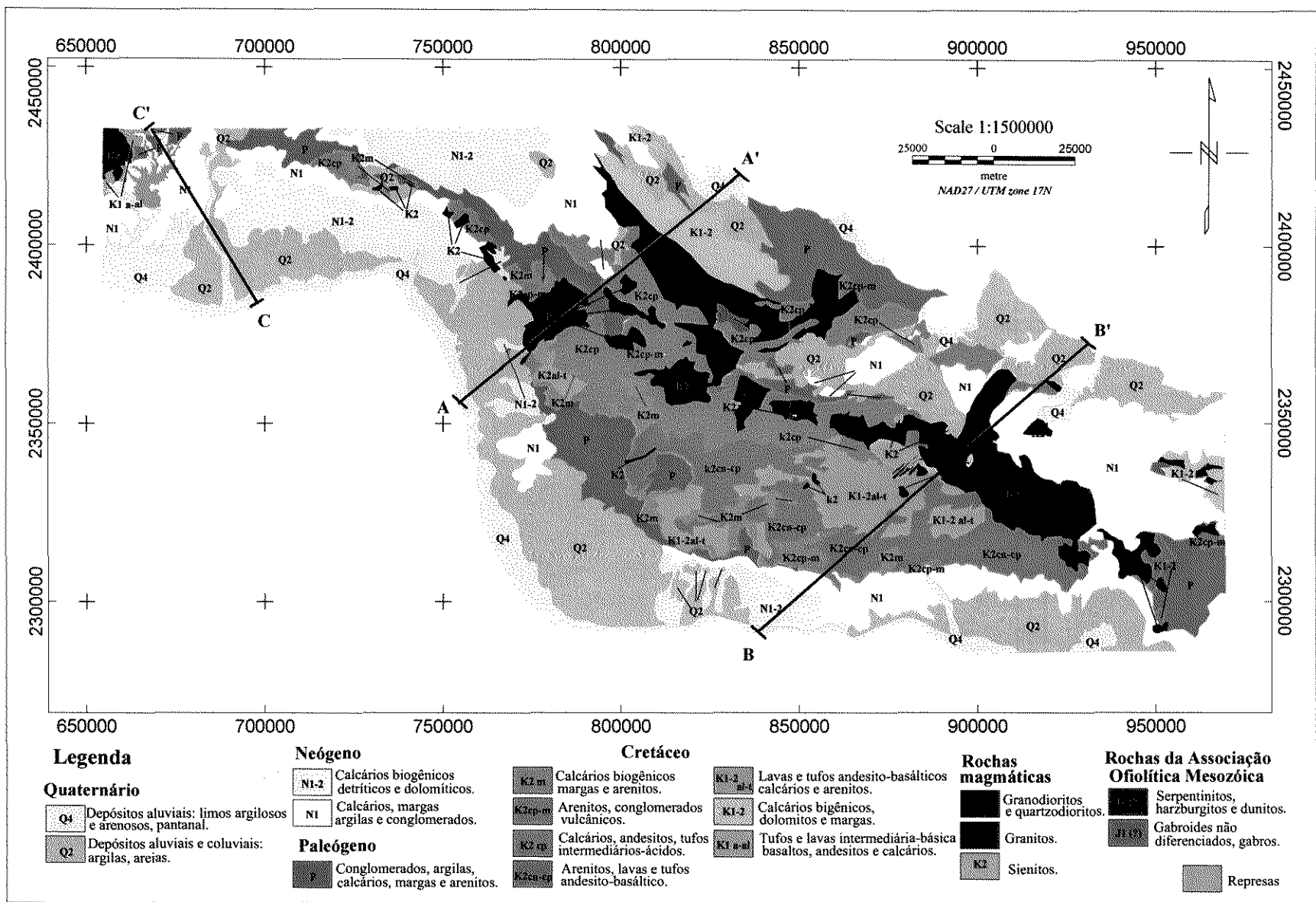


Figura 6. 1. Mapa geológico (modificado de Puscharowsky 1988), com perfis de modelagem.

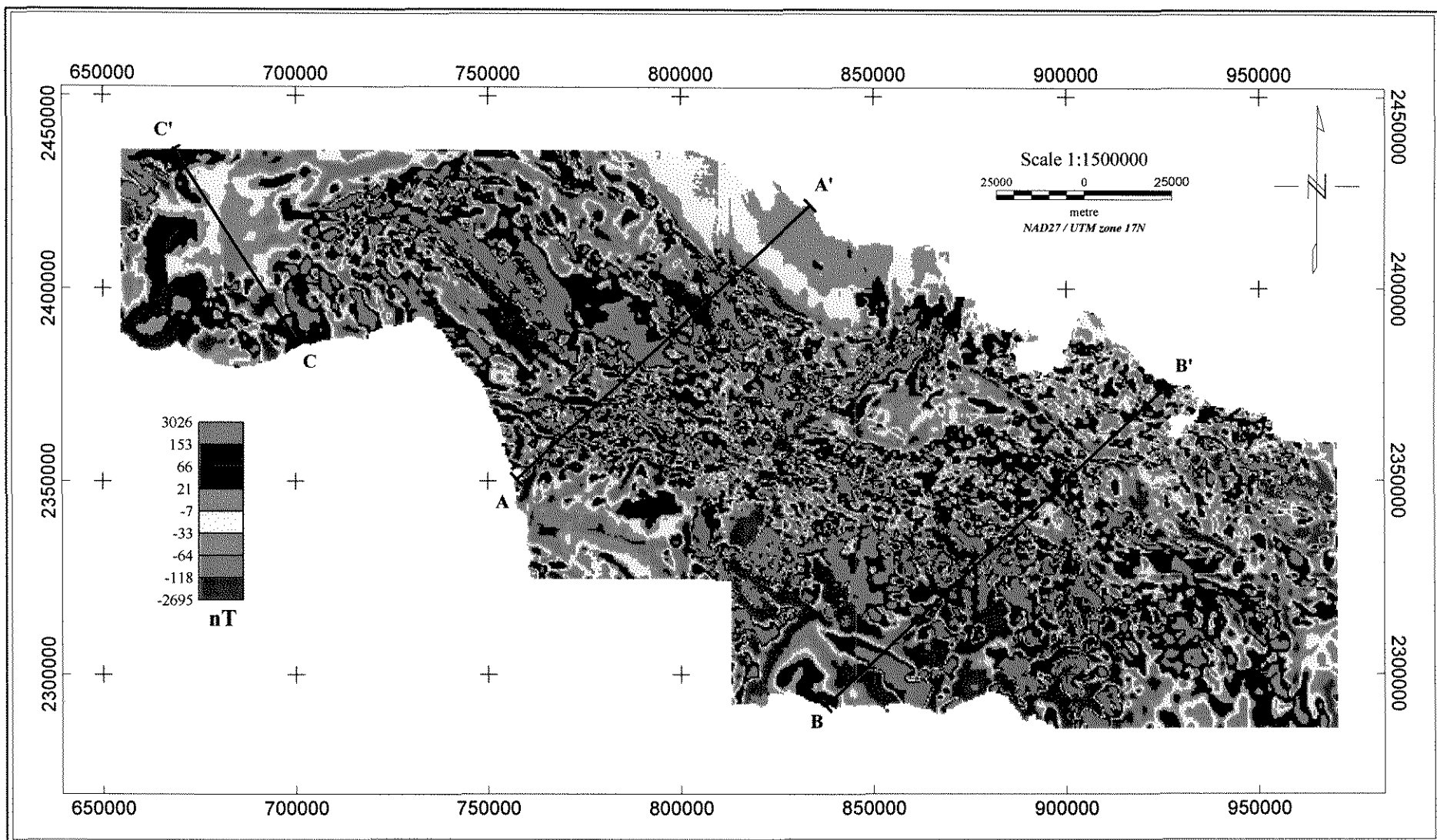


Figura 6. 2. Mapa residual de campo magnético anômalo (até 2000 m) com perfis de modelagem.

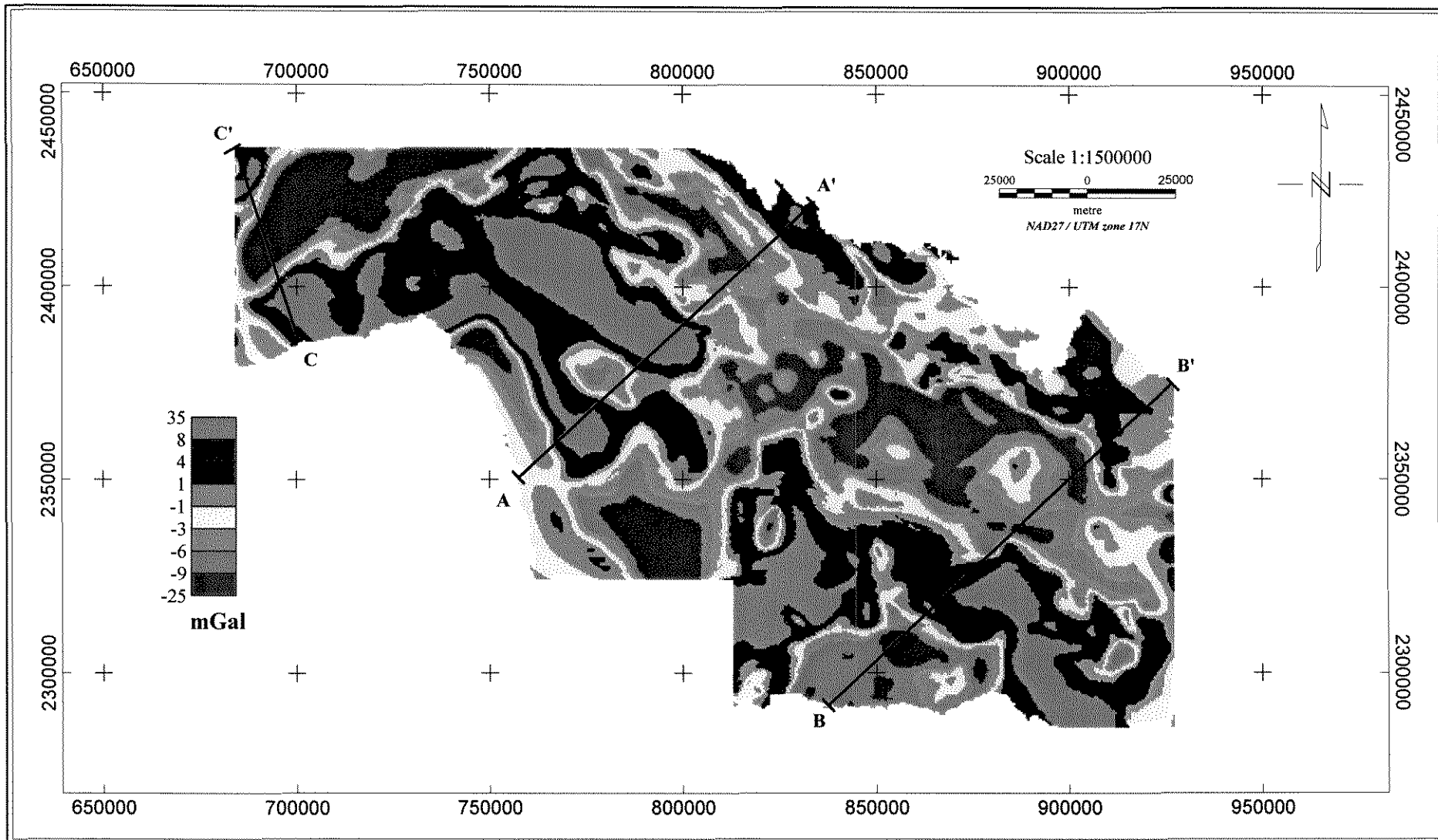


Figura 6. 3. Mapa residual de campo gravimétrico (anomalia de Bouguer) até 4000 m, com perfis de modelagem.

4- medidas de densidade e susceptibilidade magnética obtidas em laboratório, sobre amostras coletadas na área de estudo (Tabelas 6. 1 e 6. 2);

Tabela 6. 1. Valores médios de densidade e susceptibilidade magnética das unidades geotectônicas que formam o substrato dobrado em Cuba Centro-Oriental (modificado de Pérez *et al.* 1998).

Denominação	Densidade (σ . t/m ³)	Susceptibilidade magnética (χ . 10 ⁻⁵ SI)
Margem continental da Plataforma das Bahamas	2.67	100
Associação ofiolítica	2.67	1500
Arco vulcânico cretáceo	2.67	3000

5- dados obtidos a partir de mapas petrofísicos generalizados de Cuba (Vega *et al.* 1994), na escala de 1:1.000.000. Na análise do mapa de petrodensidade, confeccionado a partir do estudo do comportamento da densidade (σ) nas rochas, levou-se em conta os processos que afetaram o grau de conservação das mesmas, tais como intemperismo, tectônica, metamorfismo, entre outros.

6. 2. 2. Métodos

O processo de modelagem dos dados gravimétricos e aeromagnéticos foi realizado em uma série de etapas, descritas a seguir:

1- seleção de um modelo geológico para a área de estudo: o modelo conceitual de Iturralde-Vinent (1997) e Iturralde-Vinent *et al.* (2000) foi assumido como o mais adequado e adotado neste estudo, considerando-se que é proposto com base em trabalhos de campo sistemáticos realizados em Cuba Centro-Oriental. Em suma, o modelo de Iturralde-Vinent (op. cit) advoga a existência de um cinturão orogênico cubano, constituído pelas unidades geotectônicas continental (Plataforma das Bahamas) e oceânica (associação ofiolítica e arco vulcânico cretáceo). As unidades oceânicas teriam sido deslocadas para a Plataforma das Bahamas pela subducção e posterior colisão da placa Protocaribenha com a Norte-americana, estando as mesmas cobertas parcialmente por depósitos sedimentares mesozóicos;

Tabela 6. 2. Valores médios de densidade e susceptibilidade magnética das entidades geológicas em Cuba Centro-Oriental (modificado de Pérez *et al.* 1998).

Denominação	Densidade (σ . t/m ³)		Susceptibilidade magnética (χ . 10 ⁻⁵ SI)	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Depósitos sedimentares de bacias meso-cenozóicas	2.35	---	50	150
Seqüências calcárias da margem continental	2.63	----	50	150
Intercalações de dolomitos da margem continental	2.75	----	0	100
Complexo serpentinitico da associação ofiolítica	2.52	2.57	900	2000
Complexo peridotítico (pouco ou não serpentizado) da associação ofiolítica	2.78	2.83	50	250
Complexo plutônico de composição básica do arco vulcânico cretáceo	2.75	2.80	5500	8500
Complexo plutônico de composição básica-intermediária do arco vulcânico cretáceo	2.70	2.75	3000	6000
Complexo plutônico de composição intermediária do arco vulcânico cretáceo	2.65	2.70	2000	4000
Complexo plutônico de composição intermediária-ácida do arco vulcânico cretáceo	2.60	2.65	500	3000
Complexo efusivo-sedimentar de composição básica do arco vulcânico cretáceo	2.70	2.75	5500	8500
Complexo efusivo-sedimentar de composição básica-intermediária do arco vulcânico cretáceo	2.65	2.70	3000	6000
Complexo efusivo-sedimentar de composição intermediária do arco vulcânico cretáceo	2.60	2.65	2000	4000
Complexo efusivo-sedimentar de composição intermediária-ácida do arco vulcânico cretáceo	2.55	2.60	500	3000

2- análise das principais fontes responsáveis pelas anomalias geofísicas e suas respectivas profundidades: para cumprir tal etapa, foram utilizados os resultados dos espectros de potência do campo magnético residual (epigrafe 3. 3. 1. 2) e gravimétrico (epigrafe 4. 3. 1. 2);

3- obtenção da resposta dos campos físicos: com o objetivo de obter a resposta dos campos físicos nas profundidades escolhidas, foram confeccionados os mapas residuais do campo magnético anômalo (Figura 6. 2) e do campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) (Figura 6. 3), a partir da subtração dos mapas de continuação para cima do campo magnético anômalo até

2000 m (Figura 3. 5) e de continuação para cima do campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) até 4000 m (Figura 4. 2), dos mapas de redução ao pólo do campo magnético anômalo (Figura 3. 4) e do campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) (Figura 4. 4);

4- a influência do relevo na modelagem: visto que o relevo é um parâmetro que causa influência nas anomalias gravimétricas, este foi considerado no processo de modelagem gravimétrica, sob a forma de modelo digital de terreno (Figura 6. 4);

5- modelagem 2-D das fontes supracrustais: foi realizada a modelagem 2-D até as profundidades das fontes supracrustais causadoras de anomalias, obtidas dos espectros de potência. A modelagem baseou-se na proposta de Talwani (1959) e Talwani *et al.* (1965) e foi desenvolvida empregando-se o programa GM-SYSTM, versão 4.04 da *Northwest Geophysical Associates, Inc.*, onde as anomalias são interativamente observadas e calculadas, a partir do posicionamento dos polígonos criados, até que a anomalia calculada atinja a melhor correspondência (menor erro) com a observada;

A seguir serão expostos os procedimentos que permitiram a geração dos modelos geológico-geofísicos 2-D:

1 - seleção de três perfis regionais à oeste, centro e leste da área de estudo, compreendendo, praticamente, as principais associações litológicas documentadas em Cuba Centro-Oriental (Figura 6. 1);

2 - definição de parâmetros dos campos físicos tais como intensidade do campo magnético total, inclinação e declinação do vetor de indução magnética e altura de vôo do aerolevante;

3 - traçado (no modelo a ser criado) das superfícies correspondentes às profundidades das fontes anômalas previamente selecionadas, à partir dos espectros de potência;

4 - traçado dos polígonos correspondentes aos corpos causadores das fontes anômalas, definindo os valores de densidade e susceptibilidade magnética aparente, baseados nas Tabelas 6. 1 e 6. 2;

5 - ajuste da anomalia gravimétrica do modelo à observada;

6 - ajuste da anomalia magnética do modelo à observada, mantendo fixos os parâmetros do modelo gravimétrico;

7- confecção do modelo geológico, levando em consideração a análise da geologia superficial presente em cada perfil selecionado.

Esta seqüência de procedimentos foi aplicada aos três perfis selecionados na área de estudo.

6. 3. RESULTADO E DISCUSSÕES

Perfil A-A'

O perfil A-A' tem direção SW-NE, azimute 52° e corta a porção central da área de estudo. Este perfil secciona as estruturas e rochas de natureza oceânica (arco de ilha-associação ofiolítica) e continental (seqüências do Protocaribe-Plataforma das Bahamas), além de rochas da cobertura mesozóica (Figura 6. 1).

A geração do modelo geológico-geofísico, com base nesta seção, partiu primeiramente da análise da anomalia gravimétrica observada, visando a definição do quadro geológico-estrutural, até uma profundidade média de 4000 m (Figura 6. 3). O ajuste da anomalia calculada à observada foi obtida com erro de ajuste de 1.3 mGal (Figura 6. 5).

O ajuste da anomalia magnética procedeu-se estimando a profundidade média das fontes anômalas supracrustais até 2000 m (Figura 6. 2), com erro de 64 nT (Figura 6. 5). Na análise só foi considerada a magnetização induzida, fato que aumenta a complexidade deste campo razão pela qual, ao assumir os valores de susceptibilidade magnética aparente para cada polígono, tentou-se validar um quadro geológico regional.

A interpretação do modelo 2-D para o perfil A-A', permite as seguintes considerações (Figura 6. 4, Tabela 6. 3):

- de SW para NE, levando-se em conta principalmente o ajuste do modelo gravimétrico e ocasionalmente o magnético, foi possível definir a presença de estruturas e unidades relacionadas primeiramente às espessuras de rochas mesozóicas em contato tectônico com as unidades oceânicas (arco de ilha-associação ofiolítica) e destas por sua vez com as continentais (seqüências do Protocaribe-Plataforma das Bahamas);

- no marco geológico do AVC, o modelo gravimétrico permitiu a diferenciação dos complexos plutônico e vulcano-sedimentar;

- o complexo plutônico do AVC, a partir da interpretação gravi-magnetométrica realizada neste trabalho, foi corroborado como uma suíte granítica, caracterizada pela variabilidade lateral e ocasionalmente vertical nas propriedades físicas das rochas que a compõem (densidade e susceptibilidade), o que geologicamente foi interpretado como mudanças de fácies na suíte. Esta variação está em sintonia com os trabalhos de Marí *et al.* (1997) e Pérez e Sukar (1997), que constatavam que este complexo compreende fundamentalmente rochas plutônicas das séries calco-alcalina normal (complexo tonalito-granodiorítico) e calco-alcalino sódica (complexo gabro-plagiogranítico);

- a presença de rochas do complexo vulcano-sedimentar de composição intermediária-ácida pertencentes à bacia de retro-arco do AVC é marcado pela queda da intensidade do campo gravimétrico, associado à alta variabilidade do campo magnético

- o modelo gravi-magnetométrico mostra uma diferenciação a partir dos contrastes de densidade e susceptibilidade no contexto da associação ofiolítica, observando-se uma diminuição da intensidade do campo gravimétrico e alta variabilidade no magnético, o que sugere como variação de fácies nesta associação (eg. diferenciação no grau de serpentinização (Iturralde-Vinent 1997));

- o extremo NE do perfil mostra aumento na intensidade do campo gravimétrico e queda e posterior estabilidade do campo magnético, relacionados ao aparecimento de rochas pertencentes à margem continental da Plataforma das Bahamas em contato tectônico com as da associação ofiolítica (Iturralde-Vinent 1997). Esta unidade é constituída pelas seqüências do Protocaribe (calcários estratificados) e pelas seqüências da borda setentrional da Plataforma das Bahamas (calcários e dolomitos).

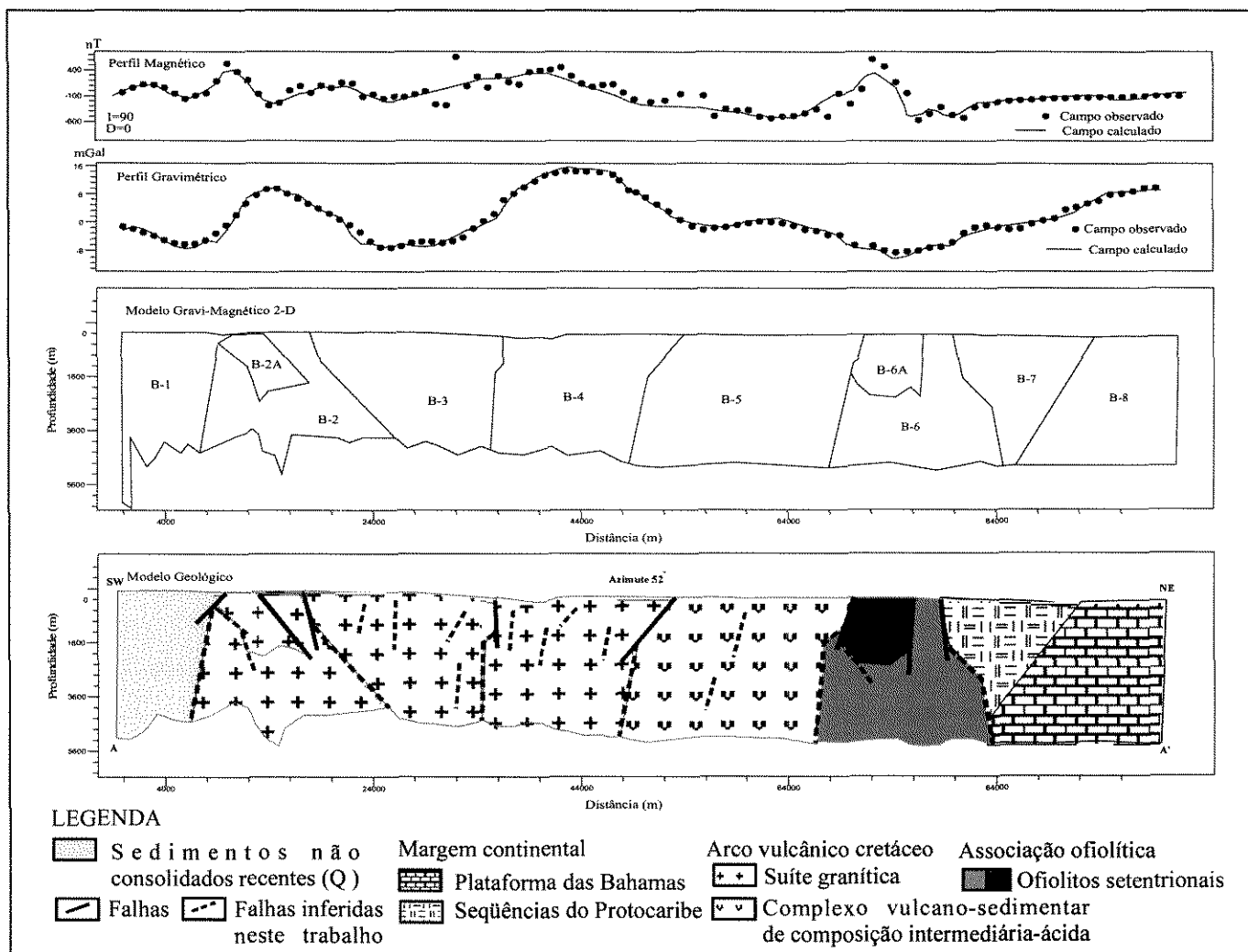


Figura 6. 4. Modelo geológico-geofísico 2-D através do perfil A-A', Cuba Centro-Oriental.

Tabela 6. 3. Resultados da modelagem geológico-geofísica em 2-D do perfil A-A' (azimute 52°)

Bloco	Densidade ($\sigma = t/m^3$)	Susceptibilidade Magnética ($\chi \cdot 10^{-5}$ SI)	Interpretação geológico-geofísica
B-1	2.38	250	Sedimentos não consolidados quaternários (argilosos e arenosos)
B-2	2.68	44100	Suíte granítica (de composição intermediária-básica do AVC)
B-2a	2.70	3000	Suíte granítica (de composição intermediária do AVC)
B-3c	2.55	3600	Suíte granítica (de composição intermediária-ácida do AVC)
B-4	2.70	4500	Suíte granítica (de composição intermediária-básica do AVC)
B-5	2.60	800	Complexo efusivo-sedimentar de composição intermediária-ácida do AVC
B-6	2.52	1600	Associação ofiolítica
B-6a	2.52	2200	Associação ofiolítica
B-7	2.61	200	Seqüências do Protocaribe da Margem Continental
B-8	2.67	250	Plataforma das Bahamas

Perfil B-B'

O perfil B-B', de direção SW-NE e azimute 52°, encontra-se situado na porção leste do setor. A seção modelada corta rochas da cobertura mesozóica, do AVC, da associação ofiolítica e da margem continental da Plataforma das Bahamas (Figura 6. 1).

Os perfis gravimétrico e magnético foram ajustados com erros de 1,18 mGal e 65 nT respectivamente (Figura 6. 6).

A interpretação do modelo 2-D através do perfil **B-B'** permite as seguintes considerações (Figura 6. 5 e Tabela 6. 4):

- o modelo gravi-magnetométrico realça a presença do AVC em contraste com as seqüências mesozóicas e associação ofiolítica-margem continental das Bahamas;

- a porção central do perfil mostra um marcante contraste de densidade associado ao AVC. Observasse, primeiramente, a presença de rochas associadas aos complexos vulcano-sedimentar, inferindo-se o aumento da intensidade do campo gravimétrico à variabilidade e alternância do magmatismo efusivo destes complexos (Piñeiro *et al.* 1997). Seguidamente no perfil gravimétrico, é observada uma queda e diminuição da intensidade do campo, fato atribuído à presença de um contato tectônico entre rochas pertencentes à suíte granítica de composição intermediária-ácida e as seqüências vulcano-sedimentar do AVC;

- o perfil magnético na mesma secção apresenta um campo bastante variável. A variabilidade deste campo pode ser devido à mudanças faciológicas nos complexos vulcano-sedimentar, o que, conseqüentemente, provoca mudanças de susceptibilidade magnética ou pode estar também associada a falhas e fraturas vinculadas ao processo evolutivo do arco;

- seguidamente observa-se uma diminuição da intensidade do campo gravimétrico que, pode ser interpretado como espessuras de sedimentos (Figura 6. 1), vinculados à bacia de retro-arco do AVC (Iturralde-Vinent 1997);

- a NE, o perfil gravimétrico é marcado por um leve incremento e posterior linearidade das intensidades do campo, o que é interpretado como a presença de um corpo tabular constituído pelos ofiolitos setentrionais entre as estruturas AVC e margem continental das Bahamas. Em superfície são observadas rochas pertencentes á associação ofiolítica misturadas com sedimentos continentais (Figura 6. 1).

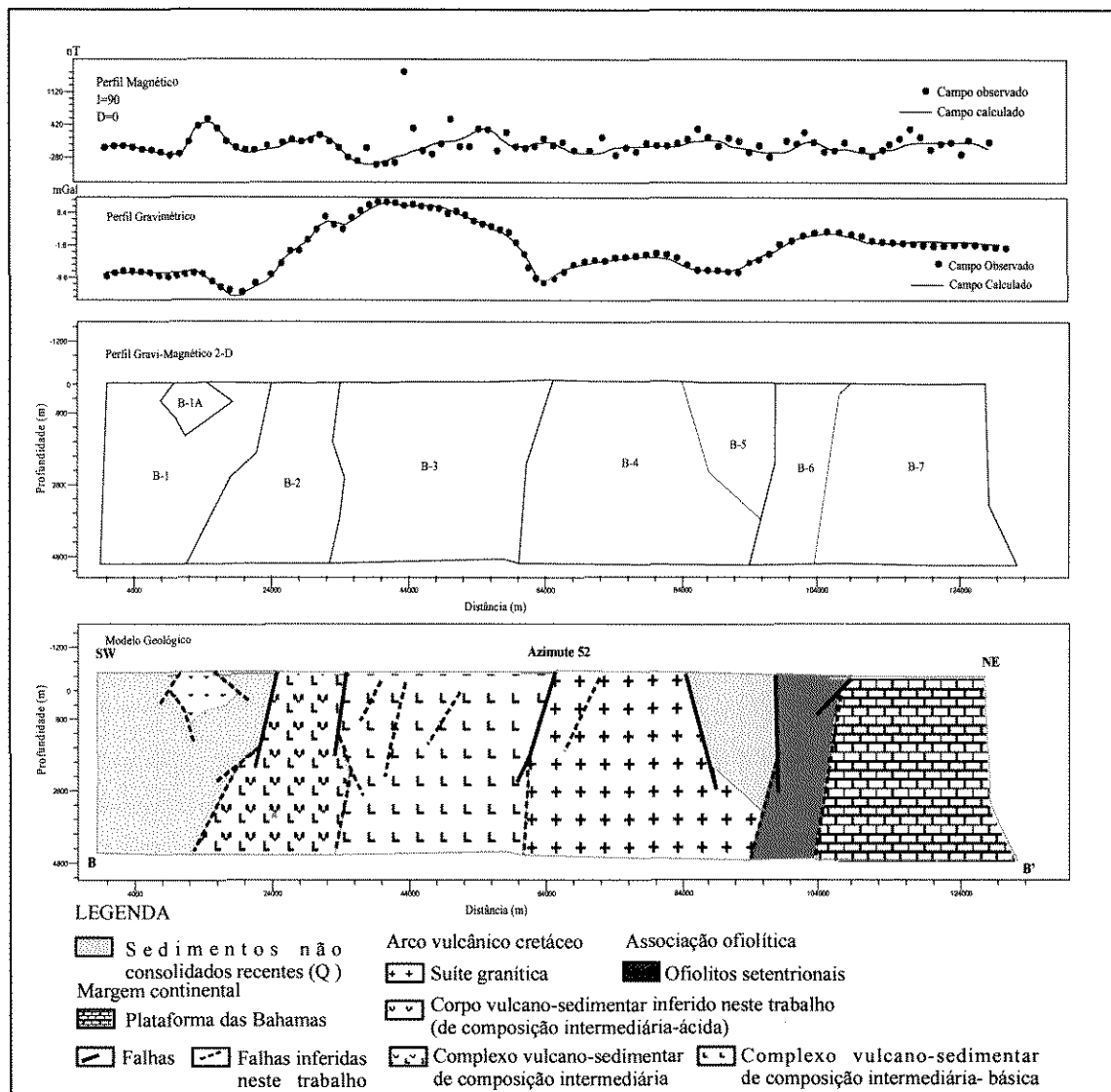


Figura 5. 6. Modelo geológico-geofísico 2-D através do perfil B-B', Cuba Centro-Oriental.

Tabela 6. 4. Resultados da modelagem geológico-geofísica em 2-D do perfil B-B' (azimute 52°)

Bloco	Densidade ($\sigma = t/m^3$)	Susceptibilidade Magnética ($\chi \cdot 10^{-5}$ SI)	Interpretação geológico-geofísica
B-1	2.40	500	Sedimentos não consolidados recentes (argilosos e arenosos)
B-1a	2.40	2000	Corpo vulcano-sedimentar (inferido) de composição intermediária-ácida do AVC
B-2	2.60	2570	Complexo vulcano-sedimentar de composição intermediária do AVC
B-3	2.65	5055	Complexo vulcano-sedimentar de composição intermediária-básica do AVC
B-4	2.60	2300	Suíte granítica (de composição intermediária-ácida do AVC)
B-5	2.30	200	Sedimentos não consolidados recentes (argilosos e arenosos)
B-6	2.55	1555	Associação ofiolítica
B-7	2.42	500	Plataforma das Bahamas

Perfil C-C'

O perfil C-C', de direção SE-NW e azimute 152°, encontra-se situado na porção oeste da área de estudo, e corta estruturas do AVC e da chamada "Bacia Central" (Figura 6. 1).

Os perfis gravimétrico e magnético foram atestado com erros de 0,7 mGal e 35 nT, respectivamente.

A interpretação do modelo 2-D através do perfil C-C', é comentada a seguir (Figura 6. 6 e Tabela 6. 5):

- ao longo do perfil, o campo gravimétrico mostra-se bastante homogêneo, sendo caracterizado por um decréscimo de intensidades, as quais tornam-se mais intensas na porção NW. Em superfície (Figura 6. 1), a maior parte da área é coberta por sedimentos terciários e quaternários. No entanto, a partir do ajuste dos campos físicos na porção inicial do perfil, propõe-se para o modelo a presença de um corpo denso e magnético, constituído pela suíte granítica do AVC de composição intermediária-ácida;

- na porção central do perfil, o campo gravimétrico torna-se gradualmente menos intenso, relacionado à presença de potentes espessuras de sedimentos recentes compreendidos na “Bacia Central” (Iturralde-Vinent 1997). No extremo NW do perfil, um leve incremento das intensidades do campo gravimétrico associa-se à presença, em superfície de rochas pertencentes a complexo vulcano-sedimentar de composição intermediária-básica do AVC;

- como pode ser observado na porção central do perfil, torna-se difícil o ajuste do campo magnético pela alta variabilidade do mesmo. Esta porção da área foi sujeita à fortes movimentos oscilatórios e intenso falhamento, fato que aparentemente contribuiu para aumentar a complexidade do campo magnético.

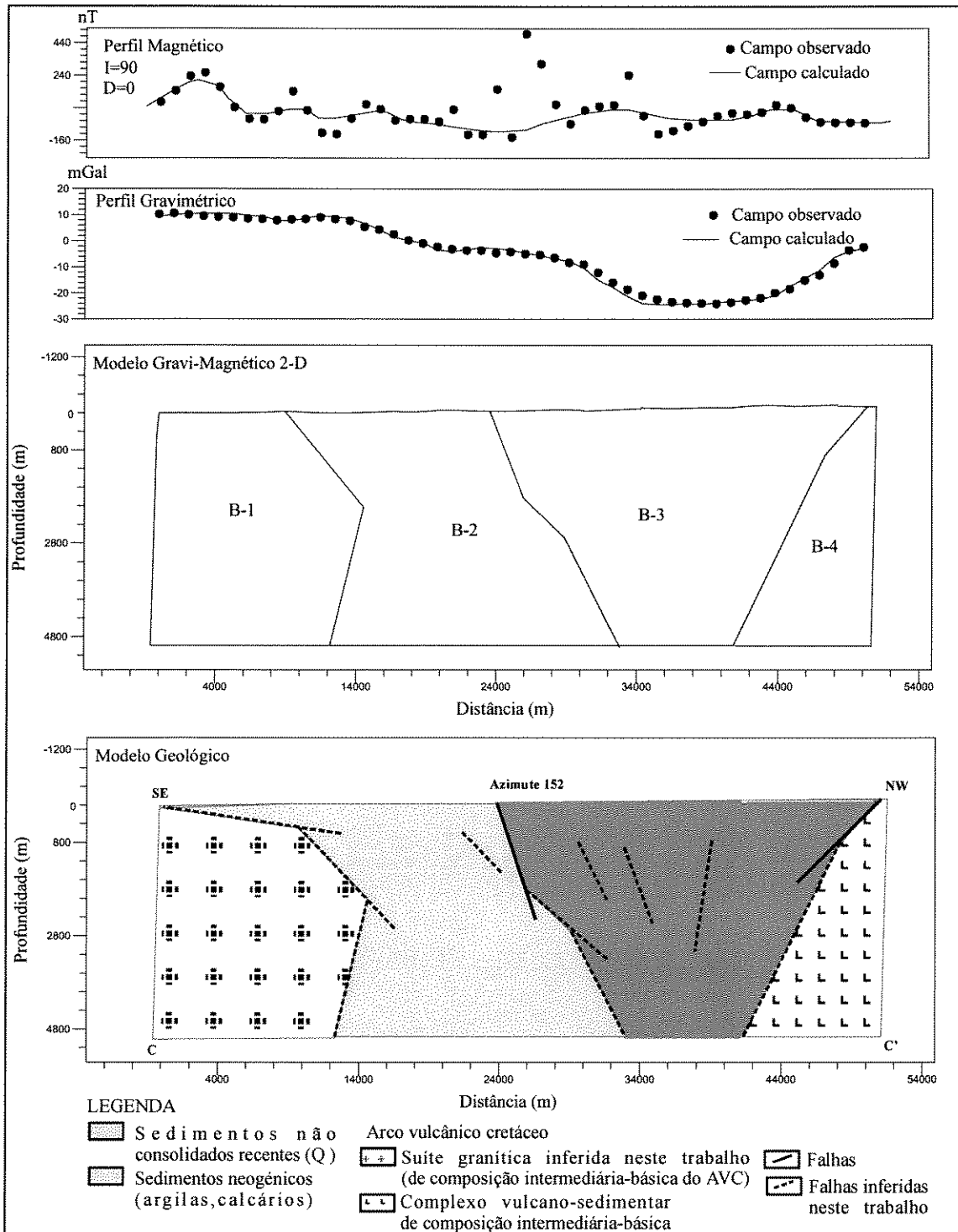


Figura 6. 6. Modelo geológico-geofísico 2-D através do perfil C-C', Cuba Centro-Oriental.

Tabela 6. 5. Resultados da modelagem geológico-geofísica em 2-D do perfil C-C' (azimute 152°)

Bloco	Densidade ($\sigma = t/m^3$)	Susceptibilidade Magnética ($\chi \cdot 10^{-5}$ SI)	Interpretação geológico-geofísica
B-1	2.68	3051	Suíte granítica inferida (de composição intermediária-básica do AVC)
B-2	2.55	651	Sedimentos não consolidados recentes
B-3	2.50	455	Sedimentos neogénicos (argilas calcários)
B-4	2.65	2500	Complexo vulcano-sedimentar de composição intermediária-básica do AVC

6. 4. CONCLUSÕES

O ajuste dos modelos gravi-magnéticos possibilitou a diferenciação entre as unidades oceânicas arco vulcânico- associação ofiolítica e separada destas, a unidade continental da Plataforma das Bahamas.

No modelo foi possível diferenciar no AVC, a presença da suíte granítica dos complexos vulcano-sedimentar.

A partir das características e posterior ajuste do campo gravimétrico, foram inferidas fácies da suíte granítica do AVC.

O ajuste do campo magnético, conjuntamente com o gravimétrico, possibilitou diferenciar o complexo vulcano-sedimentar do AVC, de acordo com a composição das rochas que o conforma.

O modelo magnético permitiu diferenciar complexos de rochas da associação ofiolítica .

No modelo do perfil C-C', pelas características dos campos físicos, foi inferida a presença de um corpo plutônico de composição intermediária-básica do AVC.

6. 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bhattacharyya, B. K. e Kuang, L. 1977. Spectral analysis of gravity and magnetic anomalies due to rectangular prismatic bodies. *Geophysics.*, **42**: 41-50.
- Bhattacharyya, B. K. 1966. Continuous spectrum of the total magnetic field anomaly due to rectangular prismatic body. *Geophysics.*, **31**: 97-121.
- Blakely, R. J. 1996. *Potential Theory in Gravity & Magnetic Applications*, Cambridge University Press., 441 p.
- Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Introducción a la Geología de Cuba. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 35-68.
- Iturralde-Vinent, M. A.; Stanek, K.; Wolf, D.; Thieke, H. U.; Müller, H. 2000. Geology of the Camaguey Region, Central Cuba Evolution of a Collisional margin in the Northern Caribbean. In: Miller H. e Hervé F. *Zeitschrift für Angewandte Geologie (Geoscientific Cooperation with Latin America-31st International Geological Congress, Rio de Janeiro 2000)*, 267-273.
- Mari, T. M. Pérez, R. M. e Sukar, S. K. 1997. Granitoides del Arco Volcánico Cretácico de la Región Central de Cuba (antigua provincia de Camaguey). In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 387-398.
- Pérez, R. M. e Sukar, S. K. 1997. Granitoides del Arco Volcánico Cretácico de la Región Central de Cuba (antigua provincia de Camaguey). In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 387-398.
- Pérez, P. E.; Pimentel, O. H.; Pardo, E. M. 1998. *Interpretación tectónico-estructural de los datos geofísicos en la región Ciego de Avila-Camaguey-Las Tunas*. Ciudad de La Habana, IGP (Relatório técnico-econômico).
- Piñero, P. E.; Quintana, M. E.; Mari, M. T. 1997. Caracterización Geológica de los depósitos vulcanógeno-sedimentarios de la región de Ciego-Camaguey-Las Tunas. In: Furrázola B. G. (ed.) *Estudios sobre la Geología de Cuba*, Ciudad de la Habana, CNDIG, 345-356.

- Puscharowski, YU. M. (eds.) 1988. *Mapa geológico de la República de Cuba a escala 1:250.000*. Academias de Ciencias de Cuba y la Unión Soviética. 40 p.
- Reynolds, J. M. 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*, Chichester, John Wiley e Sons. 796 p.
- Talwani, M. 1965. Computation with help of digital computer of magnetic anomalies caused by bodies of arbitrary shape. *Geophysics*, **30**: 797-817.
- Talwani, M.; Worzel, J. L.; Landisman, M. 1959. Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone. *Journal Geophysics Research*, **64**: 49-59.
- Vega, M.; Pérez, C. C.; García A. 1994. Mapas petrofísicos de Cuba a escala 1: 1 000 000. In: SCG, Congreso Cubano de Geología, 2, Ciudad de La Habana, *Resúmenes Expandidos*, 149.

CAPÍTULO 7. ANÁLISE INTEGRADA DE RESULTADOS E MAPEAMENTO DE ÁREAS COM POTENCIAL MINERAL

7. 1. INTRODUÇÃO

A análise integrada de dados geofísicos de caráter regional em diversas partes do mundo, visando o mapeamento geológico e a pesquisa mineral, tem sido alvo de diversos trabalhos, entre os quais destacam-se os de Broome (1990), Fernandez-Alonso e Tahon (1991), Gun (1997), Gunn e Dentith (1997), Keller *et al.* (1985), Tarloswki *et al.* (1997).

Neste capítulo, pretende-se primeiramente abordar a integração de dados geofísicos de Cuba Centro-Oriental, tendo como base o modelo tectônico proposto por Iturralde-Vinent (1997) e Iturralde-Vinent *et al.* (2000), com intuito de melhorar o mapeamento geológico-estrutural da região. Posteriormente, com o objetivo de dar continuidade a trabalhos anteriores e fornecer novos resultados, as informações provenientes do processamento de dados geofísicos serão integradas à dados sobre ocorrências de ouro (áreas testes de Capote 1999), resultando no mapeamento de novas áreas potencialmente portadoras desse metal, em Cuba Centro-Oriental.

7. 2. INTEGRAÇÃO DE RESULTADOS

A integração de resultados teve duas formas de abordagem. Primeiramente, a partir da classificação não supervisionada de dados aeromagnéticos-gravimétricos e aerogamaespectrométricos, foram gerados mapas-síntese, compreendendo diferentes ambientes geológicos de Cuba Centro-Oriental. Numa segunda etapa, foi confeccionado um mapa integrado, tendo como base os produtos resultantes da interpretação para cada categoria de dados processada.

7. 2. 1. Classificação não supervisionada de dados geofísicos de Cuba Centro-Oriental.

A análise estatística multivariada, empregando, como amostra, dados de aerolevantamentos magnético, gamaespectrométrico (CT, K, Th, U), gravimétrico e/ou eletromagnético, tem sido aplicada em geologia com o objetivo de sintetizar informações,

agrupando características geológicas e permitindo a classificação e a relação das mesmas à determinados ambientes geológicos (Harris 1989; Pires e Harthill 1989; Pires 1990; Duval e Vulkan 1993; Eberle 1993).

Harris (1989), realizou a classificação não supervisionada de dados aerogamaespectrométricos empregando a análise de grupamento de médias migratórias (*migrating means cluster*), numa área da Nova Escócia, Canadá. O autor realizou diversas classificações, combinando os canais gamaespectrométricos e razões entre radioelementos, das quais obteve bons resultados quanto à correlação com a geologia.

Pires e Harthill (1989) e Pires (1990), aplicaram a análise de grupamento (*G-mode*, *K-médias*, *Q-mode*) em áreas do Estado de Goiás, Brasil. Os autores concluíram que ao integrarem dados gamaespectrométricos (CT, K, Th e U) e magnéticos residuais, observaram uma boa correlação entre os resultados obtidos e o mapa geológico.

Duval e Vulkan (1993) aplicaram a análise de grupamento (*cluster analysis*) em uma área de Nevada. Os parâmetros geofísicos empregados foram as concentrações de K, Th, U, campo magnético residual (T) e gravidade. Baseados no trabalho de Pires (1990), processaram o campo T com o operador de pseudogravidade (Baranov 1957), para obter uma melhor correlação com a gravidade. Os resultados indicaram uma boa correlação entre o mapa obtido da análise de grupamento e a geologia da área.

Eberle (1993) empregou a análise de grupamento e análise discriminante linear (*stepwise linear discriminated analysis*) numa área ao sul do Lago Vitoria (Tanzania). Os parâmetros geofísicos utilizados foram as concentrações de K, Th, U, campo magnético residual (T) e resistividade aparente. Os resultados obtidos foram satisfatórios e contribuíram para aprimorar o mapa geológico da área.

A análise de grupamento calcula, a partir da técnica de máxima verossimilhança, a correlação das amostras partindo da distância mínima (distância euclidiana) entre elas, levando em consideração, como peso, a média e o desvio-padrão das mesmas (Davis 1976). Considerando a eficácia desta técnica na classificação não supervisionada de dados (Parks 1966; Pirkle *et al.* 1984; Crósta 1993), este método foi empregado para o processamento dos dados aeromagnéticos (reduzido ao pólo), gravimétricos (anomalia de *Bouguer*) e aerogamaespectrométricos (CT, K, Th, U, PC2 e PC3) na área de estudo.

(I) Classificação não supervisionada de dados aeromagnéticos e gravimétricos

A aplicação da técnica aos dados aeromagnéticos (reduzido ao pólo) e gravimétricos (anomalia de *Bouguer*) visando à análise geológico-estrutural, mostrou resultados interessantes. As variáveis foram agrupadas em 6 classes no setor (Figura 7. 1).

A classe 1 aparece na porção sul. Esta área é caracterizada por valores magnéticos negativos altos e gravimétricos positivos baixos, na média (Tabela 7. 1). É associada a um bloco abatido, constituindo uma estrutura de bacia, com grandes espessuras de sedimentos, de variada composição.

A classe 2, mais difusa que a anterior (Figura 7. 1), apresenta-se com valores negativos de campo magnético e gravimétrico (Tabela 7. 1). Devido a sua distribuição no setor, esta classe é associada a diferentes ambientes geotectônicos. A norte, inclui a zona de sutura e blocos abatidos que constituem estruturas de bacias. A oeste e sul, a classe 2 compreende blocos abatidos, às vezes constituindo bacias, relacionados à evolução do Arco Cretácico.

A classe 3 encontra-se localizada ao longo da porção norte-nordeste do setor e, de forma disseminada, nas áreas restantes (Figura 7.1). Caracterizada por valores médios de campo magnético e gravimétrico (Tabela 7. 1), a porção a norte-nordeste compreende o ambiente tectôno-estrutural relacionado às rochas continentais pertencentes à margem da Plataforma das Bahamas. Já as áreas restantes estão relacionadas à sedimentos de variada composição do arco vulcânico.

A classe 4, tanto por sua distribuição (Figura 7.1) quanto pela magnitude dos campos físicos (Tabela 7.1), compreende seqüências vulcânicas de composição variada, relacionadas à fase vulcano-magmática do Arco Cretácico.

O agrupamento dos valores mais intensos dos campos físicos nas classes 5 e 6 (Tabela 7. 1), indica que tais classes abrangem focos magmáticos em diferentes localidades do Arco Vulcânico Cretácico.

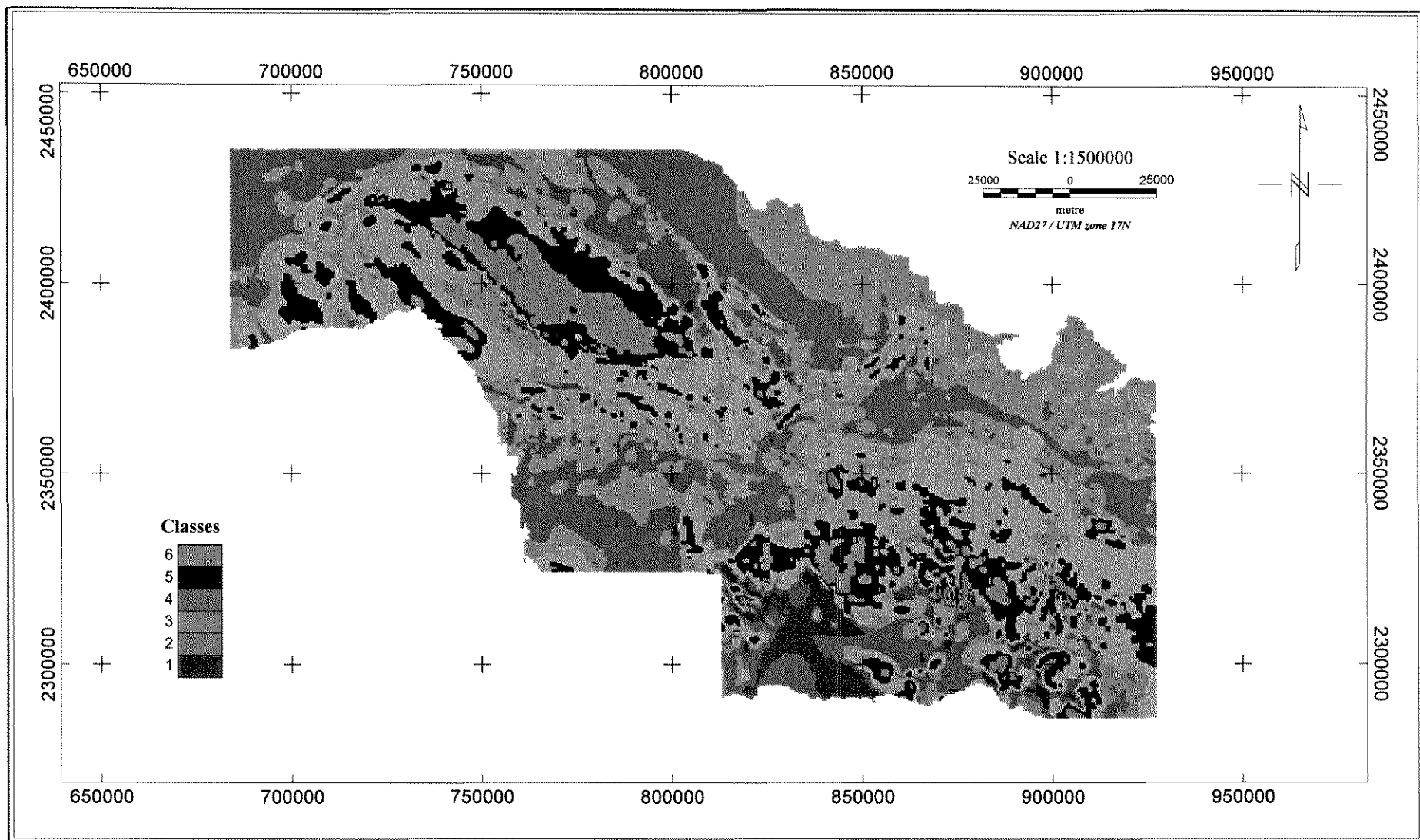


Figura 7. 1. Mapa de classificação não supervisionada de dados aeromagnéticos e gravimétricos, Cuba Centro-Oriental.

Tabela 7. 1. Estatística da análise de agrupamento (*cluster analysis*) das variáveis campo magnético (reduzido ao pólo) e gravimétrico (anomalia de *Bouguer*)

	Campo magnético (reduzido ao pólo)			Campo gravimétrico (anomalia de <i>Bouguer</i>)		
	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Valor mínimo	Valor máximo	Média
Classe 1	-2983	-381	-621	-40	61	3
Classe 2	-382	-64	-162	-56	60	-12
Classe 3	-65	134	28	-54	59	-8
Classe 4	134	387	243	-54	57	-7
Classe 5	383	805	540	-49	56	7
Classe 6	804	3225	1087	-35	54	24

(II) Classificação não supervisionada de dados aerogamaespectrométricos

Oito classes foram obtidas com a aplicação da técnica (Figura 7. 2), empregando-se, como amostras de treinamento, as variáveis: contagem total (CT), concentração dos radioelementos potássio (K), tório (Th), urânio (U) e a segunda e a terceira principais componentes dos dados gamaespectrométricos (estas últimas oferecem melhores resultados ao mapeamento em relação às razões dos radioelementos). Na tabela 7. 2 são mostrados os valores máximo, mínimo e médio das variáveis, para cada classe.

Como pode ser observado na Figura 7. 2 e na Tabela 7. 2, as classes 1 e 2 são representadas por teores baixos dos radioelementos, não existindo um predomínio radiogeoquímico nas mesmas. Estas classes representam as formações geológicas recentes, associadas à etapa neo-autóctone do cinturão dobrado.

A classe 3 localizada principalmente a noroeste e sul da área (Figura 7.2), apresenta elevados teores de tório, baixos de potássio e relativamente baixos de urânio (Tabela 7.2), associados ao desenvolvimento de crostas de intemperismo lateríticas em sedimentos recentes.

As classes 4 e 5 apresentam uma ampla distribuição nas porções centrais e centro-leste do setor (Figura 7.2). Os teores dos radioelementos apresentam uma distribuição bastante homogênea, observando-se um leve incremento dos teores de potássio (Tabela 7.2), o que é justificado pela associação destas classes com as formações vulcânicas de composição variada pertencentes ao Arco Vulcânico Cretácico.

A classe 6 abrange setores à noroeste e norte da área (Figura 7. 2), mostrando um predomínio de teores anômalos de tório (Tabela 7.2). Esta classe é localmente relacionada à classe 3 e sua resposta é também devida a presença de crostas lateríticas sobre sedimentos.

A classe 7 é mais restrita à porção central do setor, com certo predomínio na direção NW-SE, e apresenta elevadas concentrações de potássio e urânio (Figura 7.2 e Tabela 7.2). Pelas características anteriormente descritas, esta classe é relacionada principalmente à cadeia de corpos plutônicos de composição calco-alcalina pertencentes ao Arco Cretácico, corpos estes controlados pela “Falha Cubana Axial”.

Localizada a noroeste, norte e ao longo da porção central do setor (Figura 7.2), a classe 8 (Tabela 7.2) compreende rochas de natureza geológica distinta. Na porção noroeste, essa classe mantém um vínculo com as classes 3 e 6 e, conseqüentemente, apresenta concentrações anômalas de tório relacionadas ao desenvolvimento de crostas lateríticas. Na porção norte do setor, a classe 8 relaciona-se com áreas contendo teores anômalos de urânio, o que é provocado pelas concentrações de fosfatos presentes em rochas calcárias pertencentes à margem continental da Plataforma das Bahamas. Na porção central, a classe 8 exibe teores anômalos de potássio relacionados à presença das seqüências alcalinas do arco.

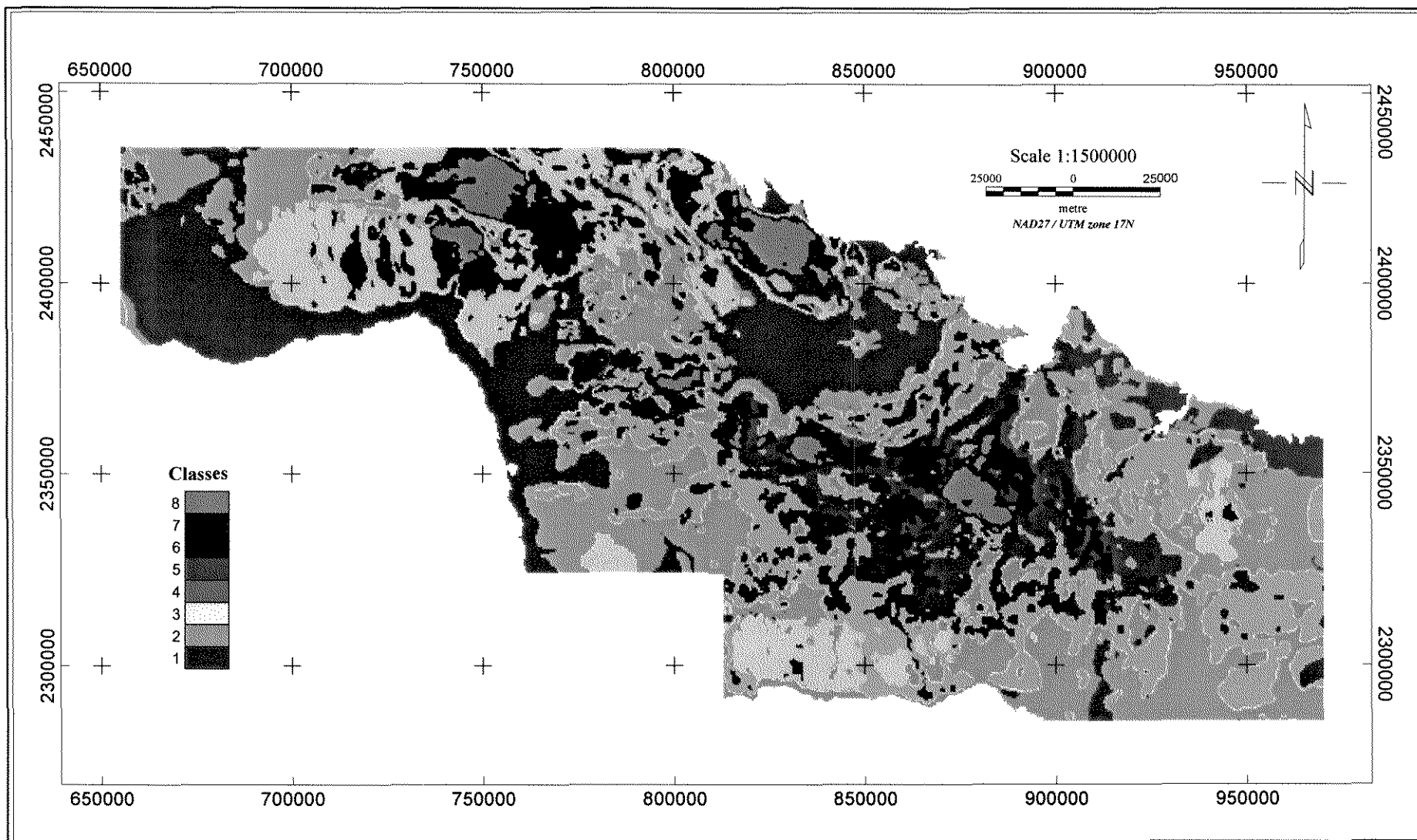


Figura 7. 2. Mapa de classificação não supervisionada de dados gamaespectrométricos, Cuba Centro-Oriental.

Tabela 7. 2. Estatística da análise de grupamento (*cluster analysis*) das variáveis CT, K, Th eU

	Contagem Total			Potássio			Tório			Urânio		
	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Valor mínimo	Valor máximo	Média	Valor mínimo	Valor máximo	Média
Classe 1	0.8	2.7	2.0	0.1	1.5	0.7	0.3	5.5	1.2	0.3	2.2	0.9
Classe 2	2.3	3.5	2.8	0.3	1.5	0.9	0.1	4.4	1.5	0.3	3.3	1.4
Classe 3	2.5	5.1	3.9	0.1	1.7	0.7	3.1	10.2	5.2	0.2	4.4	1.9
Classe 4	3.0	4.5	3.6	0.4	2.2	1.3	0.1	3.9	1.5	0.5	4.9	1.5
Classe 5	3.9	5.9	4.6	0.4	2.8	1.9	0.1	5.5	1.7	0.3	5.4	1.9
Classe 6	4.5	9.1	5.9	0.3	2.1	0.8	5.2	18.5	9.4	0.4	6.7	3.4
Classe 7	5.1	8.8	5.1	0.6	5.2	2.5	0.2	7.4	1.9	0.5	8.8	2.3
Classe 8	7.0	15.3	9.1	0.5	6.9	1.8	0.5	18.3	8.3	0.5	15.8	6.2

Com intuito de fazer uma análise integrada visual dos resultados obtidos nas duas classificações acima documentadas, foi confeccionado, para cada uma delas, um modelo em 3-D (Figura 7.3). Os modelos foram confeccionados utilizando-se o campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) (Figura 4. 1) como elevação (visto que este campo representa, com clareza, os ambientes geológico-tectônicos na área de estudo) e, como níveis temáticos, os resultados de cada classificação (Figuras 7.1 e 7.2).

A Figura 7. 3.a, ilustra, em 3-D, a correspondência existente entre os resultados da classificação do campo magnético-gravimétrico (Figura 7.1) e os diferentes ambientes resultantes da interpretação do campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*). A norte, observa-se a seqüência compreendida na classe 3, com uma elevação média a partir das intensidades do campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*), relacionada à margem continental da Plataforma das Bahamas. Observa-se ainda no modelo, uma queda provocada pela diminuição das intensidades do campo de *Bouguer* relacionada à classe 2, constituindo a zona de sutura e bacias associadas, às vezes cobertas por sedimentos vulcânicos descritos na classe 4. Já ao longo da porção central do setor, com direção NW-SE, nota-se um incremento na elevação do modelo, provocado pelos altos valores de gravidade associados aos focos magmáticos vinculados à evolução do Arco Cretácico (classes 5 e 6). Na porção sul da área, observa-se novamente uma queda na elevação do modelo, provocada pela diminuição da intensidade do campo de *Bouguer* associado às bacias também pertencentes à etapa evolutiva do arco (classes 1 e 2).

Na Figura 7.3.b, não observa-se, para todas as classes gamaespectrométricas, uma correspondência com o modelo criado a partir das intensidades do campo de *Bouguer*, fato que pode ser relacionado à fatores como relevo e drenagem, os quais podem influenciar no nível de concentração dos radioelementos numa determinada região (ver Capítulo 4). No entanto, as classes 7 e 8, que incluem concentrações anômalas de potássio vinculadas ao magmatismo calco-alcalino, relacionam-se aos altos valores de campo gravimétrico (anomalia de *Bouguer*) de direção NW-SE provocados pela presença dos focos magmáticos no Arco Cretácico.

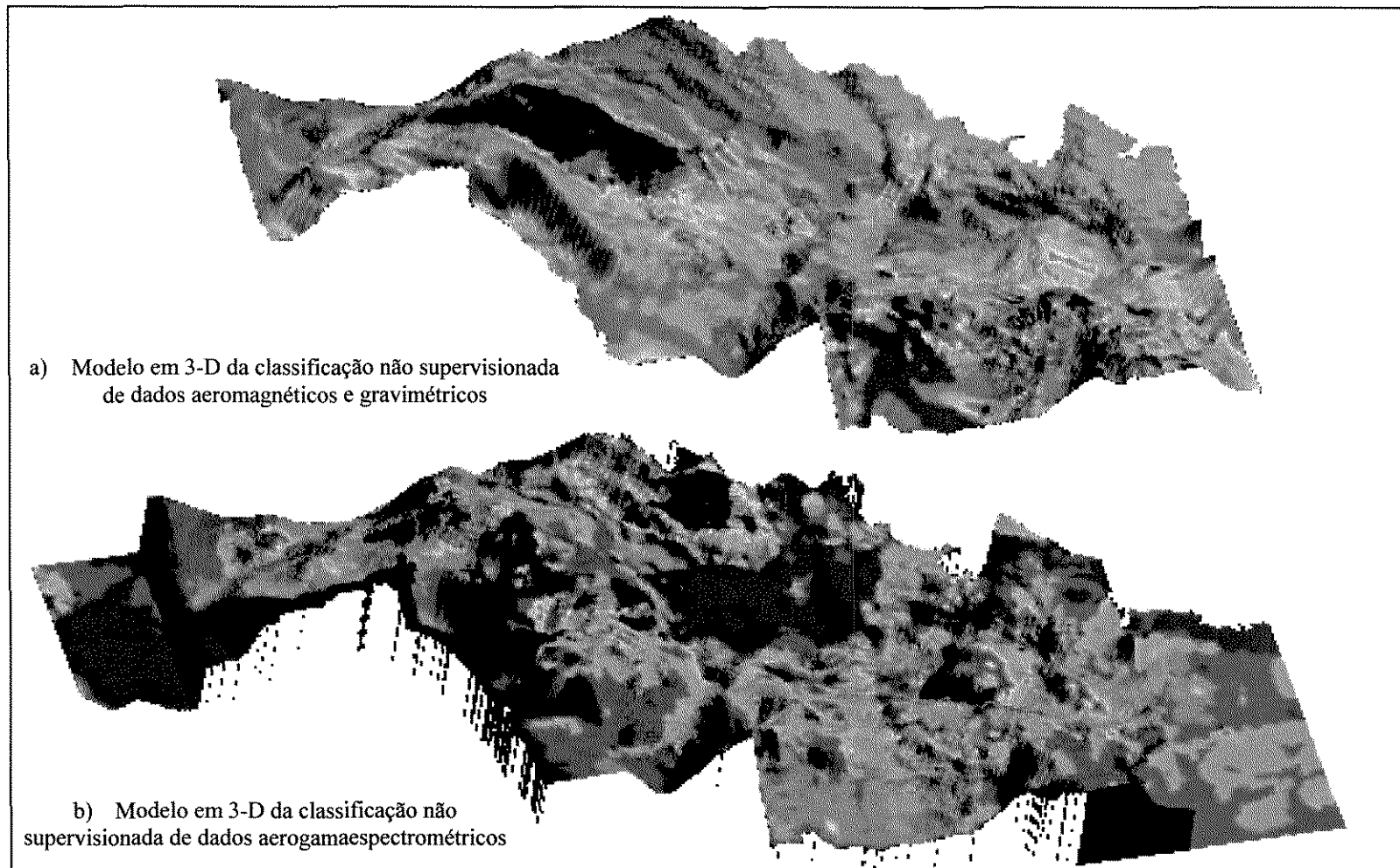


Figura 7. 3. Classificação não supervisionada de dados geofísicos em 3-D, Cuba Centro Oriental.

7. 2. 2. Mapa de integração dos dados geofísicos

Na confecção do mapa integrado para a área de estudo foram escolhidos os produtos da interpretação descritos nos capítulos 3, 4, 5 e 6, os quais serão apresentados resumidamente a seguir:

i) **dados aeromagnéticos (capítulo 3):** o processamento e interpretação dos dados aeromagnéticos com base nos trabalhos de Capote (1999), Iturralde-Vinent (1997) e Iturralde-Vinent *et al.* (2000) e Pardo (1994), permitiu a confecção do mapa de domínios magnéticos e os esquemas de lineamentos e magneto-estrutural para a área de estudo (Figuras 3.14; 3.15; 3.16).

No mapa de domínios magnéticos (Figura 3.14) foram determinados 4 domínios: o **domínio A**, de valores positivos intensos e alta susceptibilidade, foi relacionado à corpos plutônicos de composição intermediária-básica no centro e centro-sul da área de estudo, pertencentes à bacia axial do AVC. O **domínio B**, de valores positivos e susceptibilidade variável, foi relacionado às rochas vulcano-sedimentares de composição básica até ácida (que constituem a borda setentrional da bacia axial do arco), e corpos sub-vulcânicos, lavas e tufos de composição variada (pertencentes à bacia axial do arco). O **domínio C**, de valores positivos baixos até negativos e baixa susceptibilidade, foi relacionado às seqüências terrígeno-carbonáticas e sedimentos continentais da Plataforma das Bahamas e às seqüências sedimentares derivadas de fontes vulcânicas do AVC. O **domínio D**, de valores negativos e baixa susceptibilidade, foi relacionado, a norte, à zona de sutura entre as unidades continental (Plataforma das Bahamas) e oceânica (associação ofiolítica), e a oeste e sul, à bacias também pertencentes ao AVC. No esquema de lineamentos (Figura 3. 15) foram observados os principais sistemas tectônicos, o mais antigo de direção NW-SE - sistema “Cubano” - relacionado à evolução do cinturão orogênico cubano, o de direção NE - sistema “Camaguey” - responsável pelos principais eventos modeladores do quadro tectônico-estrutural na área de estudo e o mais recente N-S, vinculado a movimentos oscilatórios fundamentalmente verticais, do neo-autóctone. O esquema magneto-estrutural (Figura 3.16) evidenciou 9 domínios, relacionados às principais estruturas e processos evolutivos de Cuba Centro-Oriental;

ii) **dados gravimétricos (capítulo 4):** levando-se em consideração os resultados do processamento dos dados gravimétricos e assumindo o modelo geológico proposto por Iturralde-Vinent (1997) e Iturralde-Vinent *et al.* (2000), foram confeccionados o mapa de domínios

gravimétricos e o esquema gravi-estrutural para a área de estudo. No mapa de domínios gravimétricos (Figura 4.9), foram selecionados 3 domínios: o **domínio A**, compreende valores positivos, localmente intensos, relacionados a fontes anômalas profundas, sendo constituído por rochas de alta densidade. O domínio A foi associado, a norte da área de estudo, à unidade geotectônica continental Plataforma das Bahamas (embasamento metamórfico da margem continental) e ao centro e ao sul, à corpos pertencentes ao magmatismo-plutônico de composição intermediária- básica do AVC. O **domínio B**, de valores intermediários, relaciona-se, a norte, com sedimentos de densidade média, de natureza continental (Plataforma das Bahamas) e oceânica (associação ofiolítica). No restante da área de estudo, esse domínio relaciona-se às rochas magmáticas e vulcão-sedimentares de composição variada do AVC. O **domínio C**, de valores negativos, abrange grandes espessuras de sedimentos de baixa densidade, pertencentes às bacias formadas durante a orogenia do arco vulcânico cretácico. No esquema gravi-estrutural (Figura 4. 11), foram determinados 6 domínios relacionados às principais estruturas e processos da evolução geológico-tectônica em Cuba Centro-Oriental;

iii) **dados aerogamaespectrométricos (capítulo 5):** a interpretação dos dados gamaespectrométricos teve como base a integração dos mapas de CT, U, Th e K, ternário, potássio anômalo e principais componentes (Figuras 5.1; 5.2; 5.3; 5.4; 5.5; 5.6; 5.7; 5.8 e 5.9) com as entidades geológicas da área de estudo. Nos resultados obtidos, destacam-se, na porção central e centro leste da área, os teores de potássio como elemento predominante sobre o tório e urânio, relacionado ao aporte do magma de composição calco-alcalina e alcalina do AVC. Setores com predomínio de tório e urânio encontram-se principalmente a norte, centro-oeste e sul, relacionados à re-deposição destes radioelementos pela ação de intemperismo em sedimentos;

iii) **modelagem 2-D (capítulo 6):** a modelagem 2-D dos dados gravimétricos e magnéticos foi realizada em três perfis perpendiculares às estruturas geológicas, nas porções oeste, central e leste da área de estudo. Os modelos gravi-magnéticos possibilitaram a separação entre as unidades oceânicas 'arco vulcânico-associação ofiolítica' e, a separação destas unidades oceânicas daquelas pertencentes à continental Plataforma das Bahamas. Foram diferenciados ainda diferentes tipos de rochas da associação ofiolítica. No arco foi possível diferenciar a presença da suíte granítica nos complexos vulcano-sedimentares e, localmente, variações faciológicas desta suíte.

A análise e discussão do mapa integrado (Figura 7.4) serão realizadas de norte a sul, com base nas faixas geológico-geofísicas propostas a partir da integração dos dados.

Faixa A: localiza-se ao longo da porção N-NE da área de estudo. A assinatura dos campos gravimétrico e magnético de valores positivos e baixo gradiente nessa faixa, permite considerar a presença de rochas densas e magnéticas, típicas de embasamento continental. Esta interpretação é também suportada pelo fato de que ambientes geotectônicos continentais são caracterizados por campos gravimétricos e magnéticos elevados e de baixo gradiente, produtos da alta densidade e magnetismo das rochas que compõem o embasamento continental (Mironov 1977; Grant 1985).

A gamaespectrometria nesta faixa é caracterizada fundamentalmente pela presença de concentrações elevadas e anômalas de urânio, provocada por um possível incremento das concentrações de fósforo nos sedimentos (ver Figura. 5.12, Tabela 5.5). Segundo Dickson e Scott (1997), o incremento nas concentrações de urânio em rochas sedimentares formadas em mares pouco fundos e tranquilos (ambientes plataformais) pode ser ocasionado pelas elevadas concentrações de fósforo (P_2O_5) re-depositado nessas rochas.

Os resultados anteriormente expostos reforçam a noção de que a faixa “A” representa a porção norte do cinturão dobrado, constituído por sedimentos de idade jurássica-cretácea, pertencentes à margem continental da Plataforma das Bahamas, tal como descrito nos modelos de Iturralde-Vinent (1997) e Iturralde-Vinent *et al.* (2000).

Faixa B: localiza-se a sul da faixa “A” e também apresenta direção NW-SE. A porção oeste desta faixa é marcada por um campo gravimétrico (anomalia de Bouguer) de valores positivos baixos até negativos e altos gradientes, sendo o campo magnético mais variável, de valores positivos baixos até negativos e intensos gradientes de direção NW-SE. A porção leste desta faixa apresenta, tanto para o campo gravimétrico quanto para o magnético, assinatura caracterizada por valores negativos e ausência de gradiente. A gamaespectrometria nesta faixa não apresenta uma clara especialização, sendo caracterizada por valores de background dos radioelementos.

Segundo os modelos propostos por Iturralde-Vinent (1997) e Iturralde-Vinent *et al.* (2000), a região posterior a sul da zona Remédios é caracterizada pela presença simultânea de rochas da associação ofiolítica e sedimentos do arco cretáceo (mélange), constituindo relictos de

uma crosta de bacia de retro-arco. No entanto, Ando *et al.* (1996) e Pindell *et al.* (1988) defendem a idéia da relação dos ofiolitos ao complexo de subdução a norte, provavelmente de idade Alviana.

Recentes descobertas geoquímicas propostas no trabalho de Kerr *et al.* (1999), geraram novas expectativas acerca do modelo de evolução tectônica do cinturão dobrado cubano no Caribe. A presença de rochas boniníticas (Ando *et al.* 1996) encontradas em localidades à leste da área de estudo (pela primeira vez nas Antilhas), junto a rochas da associação ofiolítica (com datação de K-Ar entre 120-130 Ma ou mais antigas), sugere ambos complexos como pré-Alvianos e a ocorrência simultânea no estágio primário de dois arcos de ilha na região (Figura 7.5).

Um dos arcos, o boninítico, teria se desenvolvido no Jurássico Superior-Cretáceo Inferior, a norte da atual mélangé ofiolítica, estando sua gênese ligada à presença de falhas transformantes relacionadas com o início da história evolutiva da zona de subdução. A inclinação da zona de subdução do arco primitivo boninítico em direção sul, pressupõe a existência da bacia de retro-arco junto às rochas ofiolíticas. Por sua vez, esta bacia estaria geneticamente interligada à evolução do arco cretácico localizado a sul (Kerr *et al.* 1999). A presença de rochas metamórficas de alta pressão no pacote ofiolítico, implica na existência de uma faixa de exumação ligada à zona subdução (Somin e Millán 1981).

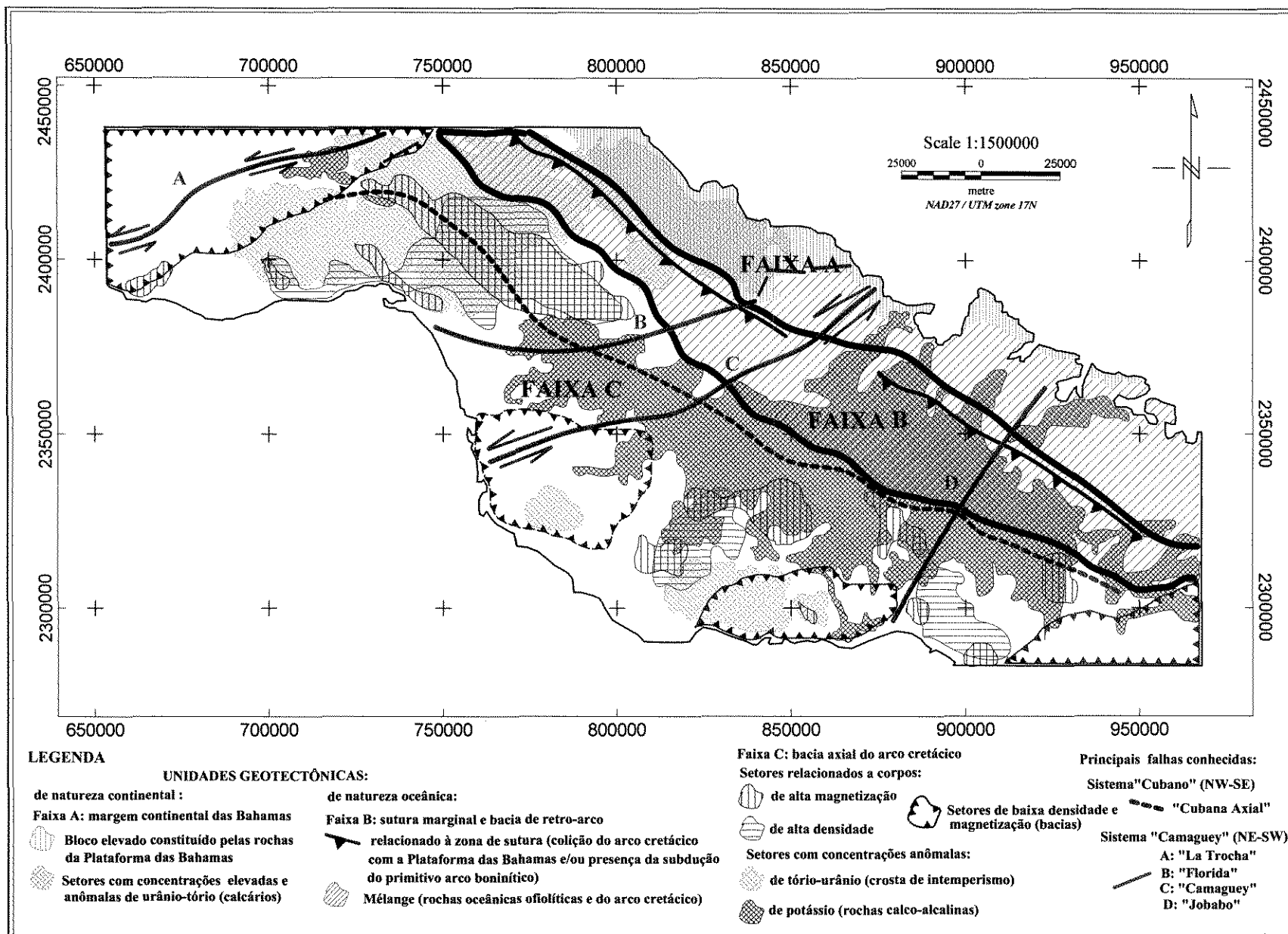


Figura 7. 4. Mapa integrado dos dados geofísicos (aeromagnetometria, gravimetria e gammaespectrometria), Cuba Centro-Oriental.

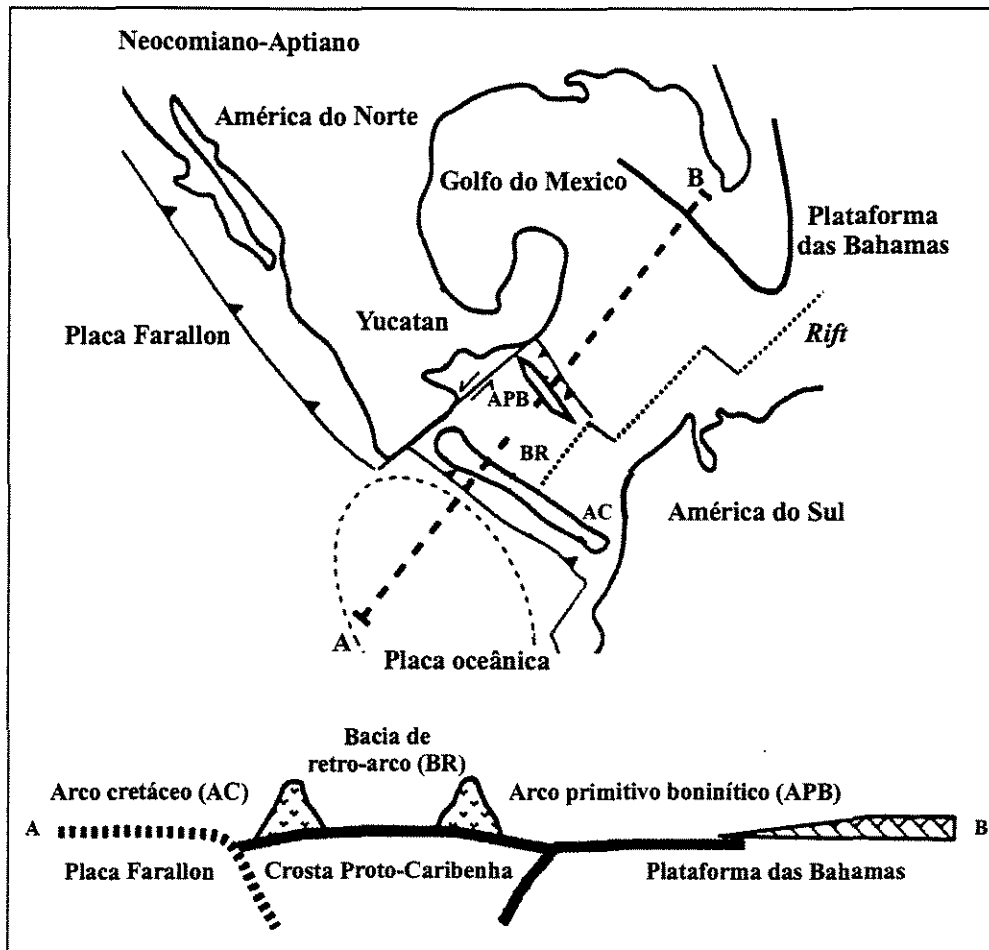


Figura 7. 5. Evolução do cinturão dobrado no contexto do Caribe no Neocomiano-Aptiano (modificado de Kerr *et al.* 1999).

Uma análise da assinatura dos campos físicos na faixa “B” à luz das descobertas expostas anteriormente, permite supor que esta faixa compreende o efeito simultâneo de diferentes eventos geotectônicos, não estando somente ligada a evolução da bacia de retro-arco do AVC (Iturralde-Vinent *et al.* 2000). A porção oeste da faixa, marcada pela queda na intensidade do campo gravimétrico, reflete a presença da possível zona de subdução de direção SW do abortado e erodido arco boninítico (Kerr *et al.* 1999), efeito este provocado por decréscimo de massa na região de sutura de arcos (Karner e Watts 1983; Sheffels e Mcnutt 1986; Windley 1995). Por sua

vez, a porção mais a leste, caracterizada por valores negativos e ausência de gradiente dos campos, evidencia a presença conjunta das bacias de retro-arco de ambos arcos vulcânicos.

A proposta anteriormente descrita a partir das assinaturas geofísicas para a faixa “B” não deve ser considerada de maneira isolada em Cuba Centro-Oriental. Doglioni *et al.* (1999) descreveu o desenvolvimento simultâneo de zonas de subdução opostas, de direção E-NE e W, no mesmo período geológico, em regiões da América Central (entre Nicarágua-Barbados) e no cinturão orogênico italiano (zonas de subdução Apennina de direção oeste e Alpina de direção leste). As zonas de subdução de direção oeste (similar à descrita na faixa “B”) apresentam um forte ângulo de subsidência e anomalia gravimétrica negativa, com gradiente entre 150-200 mGal, ao longo da região de subdução (Figura 7. 6).

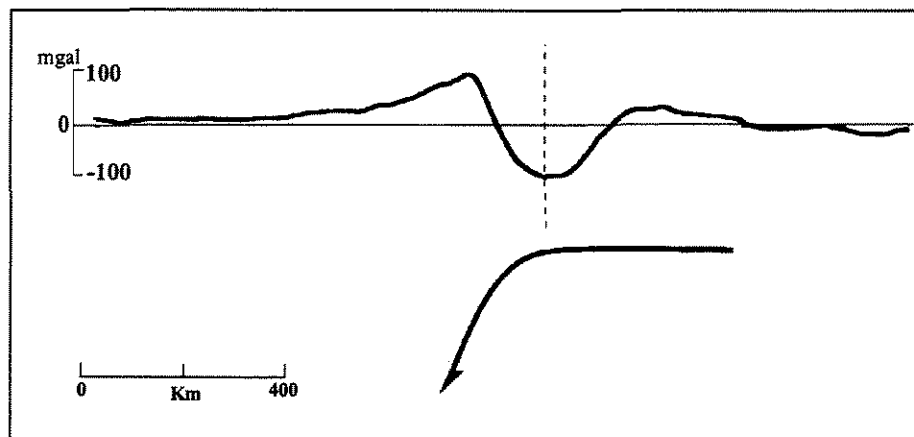


Figura 7. 6. Assinatura gravimétrica em zona de subdução de direção W (modificado de Doglioni *et al.*, 1999).

Faixa C: abrange uma extensa área, começando a noroeste, passando pelo centro até o sudeste da área de estudo. O campo gravimétrico anômalo se mostra, em geral, com valores positivos e altos gradientes de direção NW-SE, e intensas anomalias positivas profundas na porção central e sul. Também nesta faixa encontram-se setores caracterizados por extensas anomalias gravimétricas de valores negativos e ausência de gradiente.

O campo magnético apresenta-se, em geral, com valores positivos variáveis e fortes gradientes de direção NW, destacando-se no centro e sul, setores anômalos localmente intensos.

A oeste, sul e sudeste, observam-se anomalias negativas do campo magnético, com ausência de gradiente.

A gamaespectrometria nesta faixa apresenta uma maior complexidade. No centro-oeste é marcante a especialização em tório e ocasionalmente urânio, tornando-se majoritariamente potássica a leste, numa cadeia de valores anômalos de direção NW-SE, e a sul, com valores anômalos locais.

A análise das assinaturas geofísicas expressas na faixa “C” com base nos atuais modelos geológicos (Iturralde-Vinent 1997; Iturralde-Vinent *et al.* 2000; Kerr *et al.* 1999), permitem considerar esta faixa como representativa da parte ativa do arco cretácico (bacia axial), constituída por corpos plutônicos, sub-vulcânicos, lavas de variada composição (Pérez e Sukar 1997; Piñeiro *et al.* 1997; Marí 1997) e formada como consequência da subdução do arco a sul do arquipélago (no atual Mar Caribe), mergulhando para NE.

O acima proposto é também descrito por Doglioni *et al.* (1999) para zonas de subdução de direção E-EN (típicas das regiões centro e sul-americanas), onde o magmatismo formado em condições de alta pressão e baixo grau de fusão é majoritariamente representado por rochas intrusivas plutônicas graníticas, a petroquímica varia de composição calco-alcalina até alcalina altamente potássica e os campos físicos são caracterizados por fortes gradientes e intensas anomalias gravimétricas e magnéticas.

7. 3. INTEGRAÇÃO DE RESULTADOS E MAPEAMENTO DE ÁREAS COM POTENCIAL MINERAL

Uma das tarefas mais complexas da exploração geofísica é a detecção de depósitos de ouro, em função da complexidade de suas assinaturas. Os métodos magnético e gamaespectrométrico (contagem total e potássio) são bastante empregados na busca destes depósitos em escala regional, contribuindo para o mapeamento geológico e detecção de zonas de falhas e alterações metassomáticas (Doyle 1990).

Na área de estudo, a proposta de considerar o arco vulcânico cretácico como a unidade de maior potencial metalogenético, deve-se ao fato de estar sua evolução relacionada a subdução das placas em direção N-NE (Iturralde-Vinent 1997; Iturralde-Vinent *et al.* 2000; Kerr *et al.* 1999) e, conseqüentemente, à presença de um magmatismo de composição calco-alcalina até alcalina

altamente potássica (Marí 1997; Pérez e Sukar 1997). Segundo Doglioni *et al.* (1999), em zonas de subdução de direção N-NE, aproximadamente a 100 km de profundidade, acontece a desidratação das rochas da placa subductada, provocando a fusão dos magmas formadores dos complexos intrusivos e efusivos do arco, sendo a petroquímica dos complexos principalmente calco-alcalina normal até alcalina altamente potássica. Windley (1995) aponta que, em arcos de ilhas a sucessão de depósitos minerais é correlacionável à posição da zona de subdução e, por conseqüência, à variação composicional dos complexos rochosos relacionados ao estágio de maturidade do arco. Estes estágios podem ser três: inicial (toleítico-boninitico), médio (calco-alcalino) e tardio (também calco-alcalino), sendo que, o estágio calco-alcalino médio-tardio é o que apresenta o maior potencial metalogênético, compreendendo depósitos de Cu-Au porfíricos relacionados a plutons calco-alcalinos (ex. Filipinas), depósitos epitermais de Au-Ag formados a profundidades de 1 km durante os processos magmáticos do arco (ex. Indonésia, Filipinas e Japão) e depósitos metassomáticos de tipo *skarn* calco-magnético associados a complexos dioríticos (ex. Cuba e Filipinas).

A análise integrada sobre áreas potenciais de ouro em Cuba Centro-Oriental foi realizada com base no trabalho de Capote (1999). Foram utilizados três setores de maior potencial mineral no arco cretáceo (Figura 7.7), pelo fato destes incluírem ocorrências conhecidas desse metal, associadas à halos de alteração hidrotermal de até 300 m de comprimento por 40 m de largura (Capote *op cit*). Além disso, estas ocorrências encontram-se posicionadas no eixo magmático do arco, o que favorece as condições magmático-estruturais de formação de outros depósitos.

Pérez *et al.* (1998) propõe, como guias de prospecção de depósitos metálicos para a área de estudo, a presença de: **i)** tectno-lineamentos de direção W-NW (sistema “Cubano”) paralelos à falha “Cubana Axial”, responsáveis pela magmatismo intrusivo e efusivo relacionado a metalogênese do arco; **ii)** tectono-lineamentos de direção NE (sistema “Camaguey”), destacando-se como setores de interesse as intersecções de ambos sistemas; **iii)** anomalias de potássio vinculadas à intrusivos alcalinos e alterações metassomáticas, possíveis hospedeiros de mineralizações (Gnojek e Prichstal 1985; Portonv 1987). Por sua vez, Capote (1999) na sua proposta, define como “fatores magmático-estruturais de mineralização” o cruzamento dos sistemas de falhas W-NW, NE e N-S (embora esta última seja de difícil detecção ao nível regional), relacionados às zonas de desenvolvimento de rochas vulcânicas, corpos intrusivos plutônicos e sub-vulcânicos.

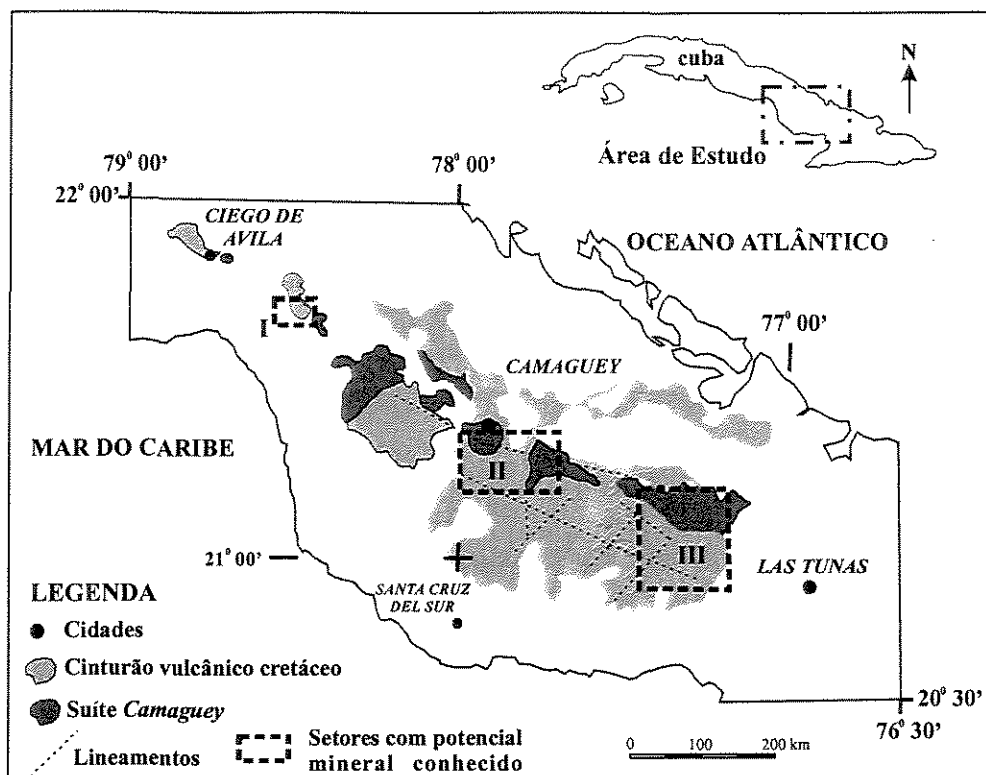


Figura 7. 7. Setores de maior ocorrência de ouro na área de estudo (modificado de Capote 1999).

A seguir, serão apresentados os resultados da análise integrada dos dados geofísicos nos setores de maior ocorrência de ouro (áreas testes) e a proposta de novas áreas alvos:

Sector I: localizado na porção centro-oeste da área de estudo (Figura 7.7), este setor compreende três ocorrências de ouro (do tipo epitermal, de alta sulfetação), conhecidas conjuntamente como “Gaspar”. A mineralização encontra-se relacionada a estruturas vulcânicas de composição principalmente intermediária-ácida (Figura 7. 8. a), pertencentes à fase tardia de desenvolvimento do arco (K_2 cp) (Piñeiro *et al.* 1997) e intrudidas por granitoides de idade K_2 (Marí 1997; Pérez e Sukar 1997). Segundo Capote (1999), estas estruturas foram geradas no cruzamento de uma falha de direção NW com outra NE e N-S, respectivamente.

As respostas dos mapas dos campos físicos selecionados para o setor I são: no mapa ternário (Figura 7.8.b) observa-se, paralelamente à direção das ocorrências minerais, um discreto

aumento dos teores de potássio no contato entre as rochas vulcânicas (K_2 cp) e formações recentes (P). Essa assinatura constitui um importante guia de prospecção, considerando a presença da alteração argílica avançada relacionada ao enriquecimento potássico em depósitos auríferos (Portonv 1987).

O mapa de amplitude de sinal analítico de campo magnético (Figura 7.8.c) mostra uma seqüência de valores positivos intensos segundo a direção NW, relacionados à presença de uma estrutura vulcânica magnética nessa direção. O mapa de derivada vertical em Z (Figura 7.8.d) mostra uma tendência de fortes gradientes na direção NW, interceptados por outros de direção NE, sendo os de direção N-S de difícil detecção. Estes resultados levam a proposta do esquema de lineamentos (Figura 7.8.e), onde nota-se a presença de ocorrências minerais relacionadas à zona de cruzamento de lineamentos de direção NW e NE.

Considerando os resultados anteriormente expostos, dois novos setores de interesse foram propostos, a noroeste e sudeste do setor I, respectivamente (Figura 7.8.a). Ambos setores localizam-se no contato entre formações vulcânicas (K_2 cp) e formações recentes, e apresentam assinaturas geofísicas similares às descritas para o setor I (Figuras 7.8.a e 7.8.b): **(i)** incremento nos teores de potássio no contato das formações geológicas; **(ii)** alta amplitude de sinal analítico relacionada a estrutura magnética alongada de direção NW e; **(iii)** fortes gradientes da derivada vertical em Z, em resposta ao cruzamento de lineamento de direção NW e NE.

Setor II: localizado no centro da área de estudo (Figura 7.7), abrange as ocorrências de ouro também do tipo epitermal de alta sulfetação “Jaguey” e “La Mina”. Estas ocorrências encontram-se nas seqüências vulcânicas (K_2 cp) de composição intermediária-ácida (Piñeiro 1997), em contato com quartzo-dioritos, granosienitos e sienitos (K_2) (Marí 1997; Pérez e Sukar 1997), (Figura 7.9.a).

As respostas dos campos físicos relacionados às ocorrências minerais no setor II são descritas a seguir. No mapa ternário (Figura 7.9.b), observa-se um notável incremento das concentrações de potássio. Embora esta assinatura possa ser considerada como um indicador da presença de alterações metassomáticas relacionadas a depósitos de ouro (Gnojek e Prichsthal 1985; Portonv 1987), a presença, neste setor, de rochas sieníticas com elevados conteúdos de potássio, torna a indicação ambígua.

O mapa de amplitude de sinal analítico (Figura 7.9.c) mostra um campo com estrutura de “mosaico”, de intensos valores positivos e geometria variada, provocado pela grande incidência de corpos magnéticos, reflexo da intensa atividade vulcânica-plutônica relacionada ao magmatismo de composição calco-alcálico (Marí 1997; Pérez e Sukar 1997). O mapa de derivada vertical em Z (Figura 7.9.d) mostra fortes gradientes de direção NW, NE e ocasionalmente N-S, destacando-se, entre as ocorrências minerais “Jagüey” e “La Mina”, uma importante estrutura de direção NW, seccionada por outra de direção NE. Este quadro tectônico é representado no esquema de lineamentos (Figura 7.9.e), onde a localização das ocorrências minerais em ambos os lados da zona de cruzamento indica o forte controle que estas estruturas exercem sobre estas mineralizações de ouro.

A leste do setor II foi proposta uma nova área de interesse (Figura 7.9.a). As principais assinaturas que levaram a considerar esta área com potencial metalogenético são a presença de intrusivos graníticos (K_2) em contato com seqüências vulcânicas (K_2 cp) (Figura 7.9.a), e elevados teores de potássio (Figura 7.9.b), possivelmente relacionados à composição das formações presentes. O mapa de sinal analítico (Figura 7.9.c) mostra também várias estruturas em “mosaico”. Na imagem da derivada em Z (Figura 7.9.b), observa-se um discreto lineamento de direção NW-SE, sendo este a possível continuação da estrutura observada no setor II, controladora das ocorrências ali presentes. São também visualizados no mapa de derivada em Z, fortes gradientes de direção NE, os quais, conjuntamente com os anteriormente descritos, são mostrados no esquema de lineamentos (Figura 7.9.b). Estes lineamentos reforçam a proposta de interesse nesta área.

Setor III: constitui um dos mais importantes setores com ocorrências minerais conhecidas na área de estudo (Figura 7.7), similar a outros das Grandes Antilhas (Santo Domingo, Porto Rico), onde rochas vulcânicas cretácicas são hospedeiras de mineralizações de ouro (Simon *et al.* 1999).

Os depósitos minerais de ouro que mais se destacam no setor III são: ao centro, o depósito “Florência”, pertencente ao chamado campo mineral “Guaimaro”, e classificado como um depósito epitermal de baixa sulfetação, estando localizado no contato das seqüências vulcânicas cretácicas (K_{1-2} al-t) com o corpo intrusivo (K_2) “Guaimaro” (Figura 7.10.a) (Pérez e Sukar 1997); a sudeste, o depósito “Golden Hill”, epitermal de alta sulfetação, encontra-se relacionado

com a cratera erodida de um antigo vulcão, na área de desenvolvimento de rochas vulcânicas cretácicas (K₂ cn-cp) de composição básica-intermediária até ácida (Figura 7.10.a).

Os resultados dos dados geofísicos obtidos para o setor III indicam que existe um predomínio das concentrações de potássio em toda a área (Figura 7.10.b), provocado pelo estágio de desenvolvimento avançado de seqüências vulcânicas calco-alcálicas. Esse fato é favorável ao potencial metalogenético do setor, considerando a relação destas rochas à presença de ocorrências epitermais de ouro e metais base (Corbett e Leach 1997).

O mapa de amplitude de sinal analítico (Figura 7.10.c) destaca a presença de estruturas magnéticas de variada geometria, possivelmente vinculadas à presença de corpos sub-vulcânicos na região de desenvolvimento dos depósitos “Florência” e “Golden Hill”. Por sua vez, no mapa de derivada em Z (Figura 7.10.d), observa-se um incremento na freqüência de gradientes de direção NW, NE e N-S, os quais são mostrados nos esquema de lineamentos (Figura 7.10.e). Da mesma forma como comentado anteriormente, essas zonas de cruzamento de falhas são favoráveis ao desenvolvimento e reativação magmática, podendo influenciar fortemente no controle de depósitos minerais.

Duas novas áreas, a oeste e leste do setor III, são propostas como alvos potenciais para ouro (Figura 7.10.a). Estas áreas incluem formações geológicas de reconhecida favorabilidade à presença de estruturas vulcânicas hospedeiras de mineralizações de ouro, e são caracterizadas por elevados teores de potássio (Figura 7.10.b). O mapa de sinal analítico (Figura 7.10.c) mostra que tanto o setor teste quanto os propostos estão compreendidos numa mega-estrutura, que envolve a presença de estruturas magnéticas menores, possivelmente relacionadas à um mesmo evento tectôno-magmático.

No mapa de derivada em Z (Figura 7.10.d), observa-se, nas novas áreas propostas, uma grande freqüência de gradientes de direção NW, SE e ocasionalmente N-S, similarmente ao setor II, os quais apresentam, em alguns casos, continuidade de um setor para outro. Isto é ilustrado no esquema de lineamentos (Figura 7.10.e), onde é possível observar diferentes zonas de cruzamentos de estruturas geológicas, que constituem sítios potenciais para hospedar ou exercer controle sobre mineralizações de ouro.

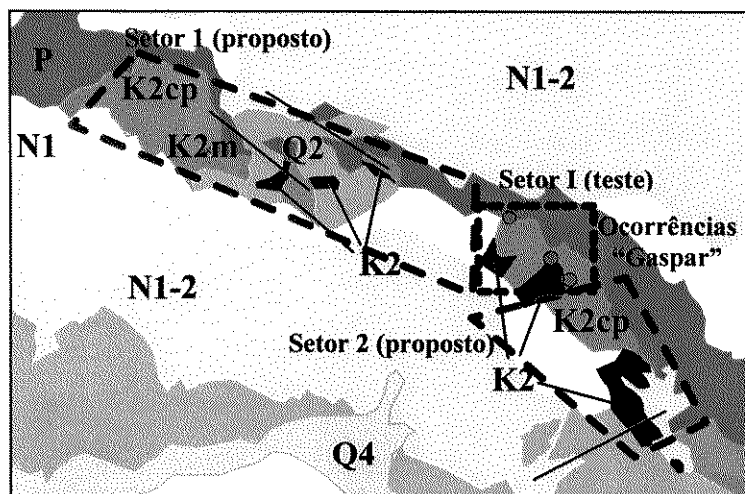


Figura 7. 8. (a) Mapa geológico.

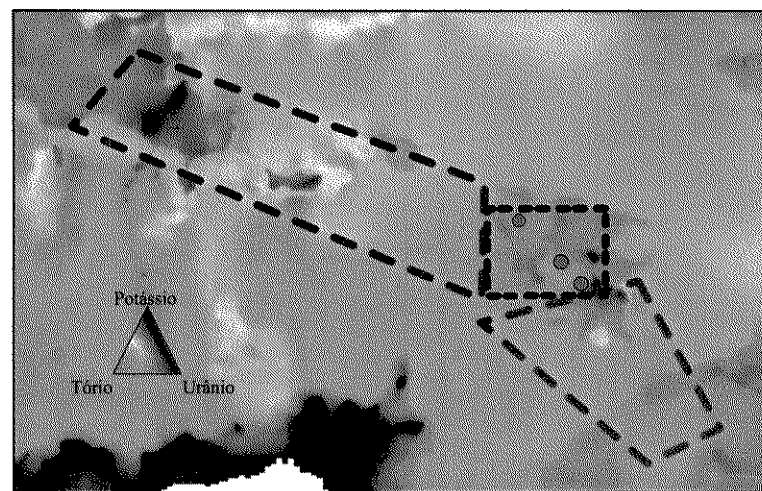
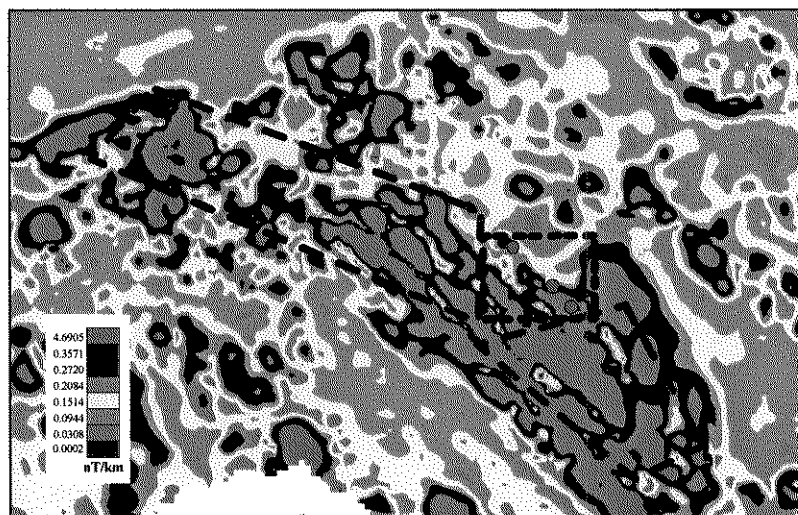


Figura 7. 8. (b) Mapa ternário.



7. 8. (c) Mapa de amplitude de sinal analítico.

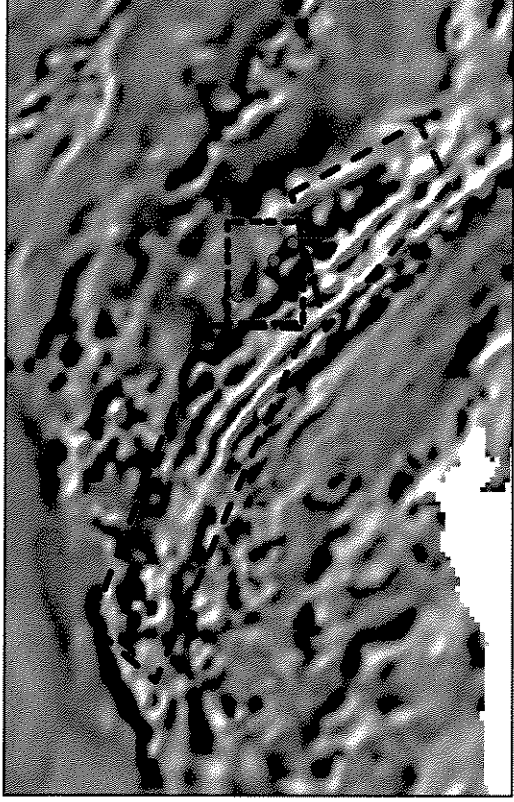


Figura 7.8. (d) Mapa de derivada vertical em Z.

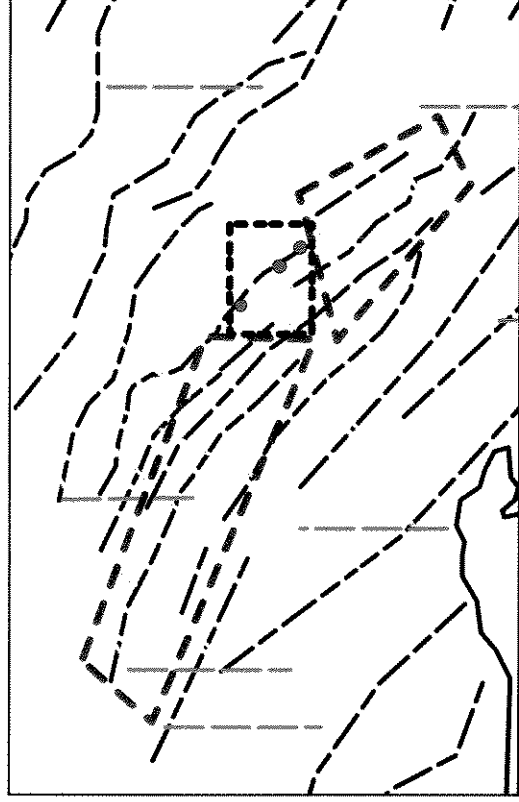


Figura 7.8. (e) Esquema de lineamentos.

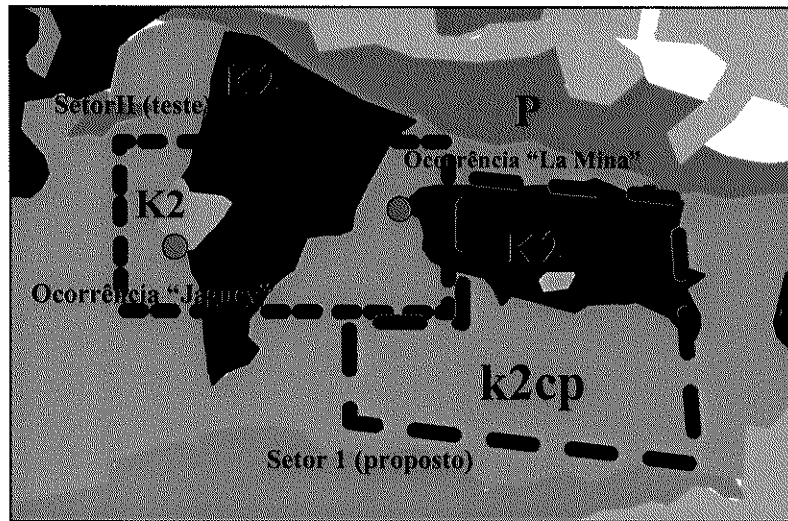


Figura 7. 9. (a) Mapa geológico.

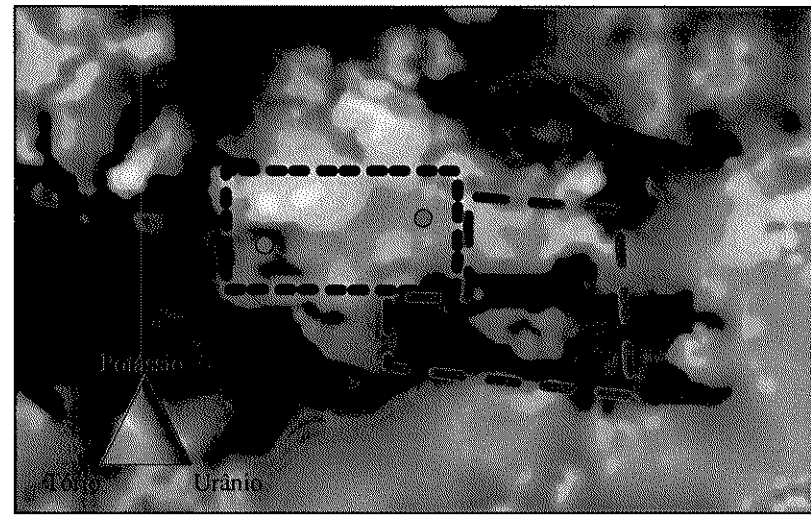
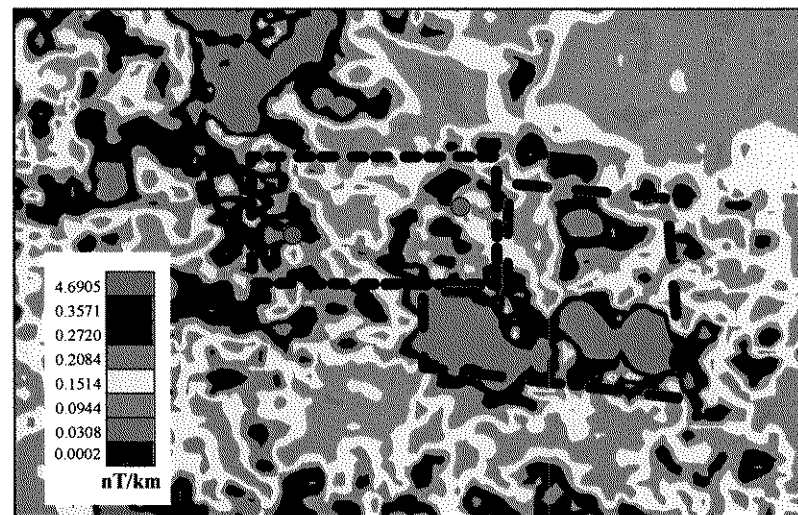


Figura 7. 9. (b) Mapa ternário.



7. 9. (c) Mapa de amplitude de sinal analítico.

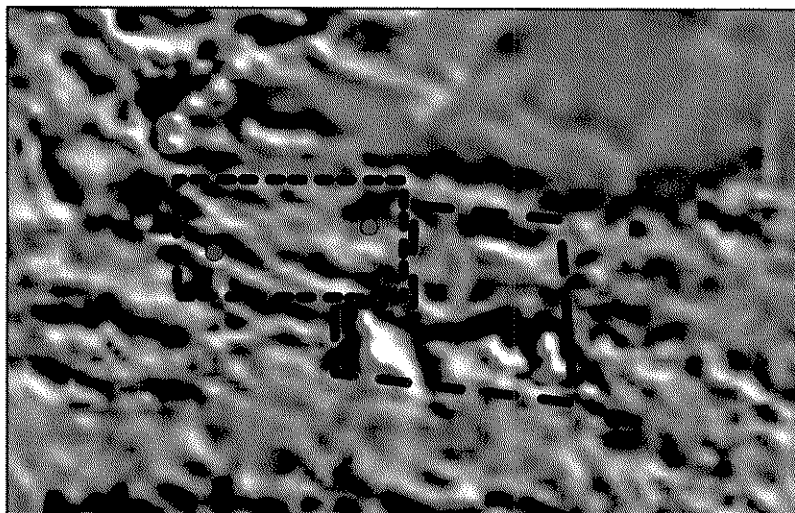


Figura 7. 9. (d) Mapa de derivada vertical em Z.

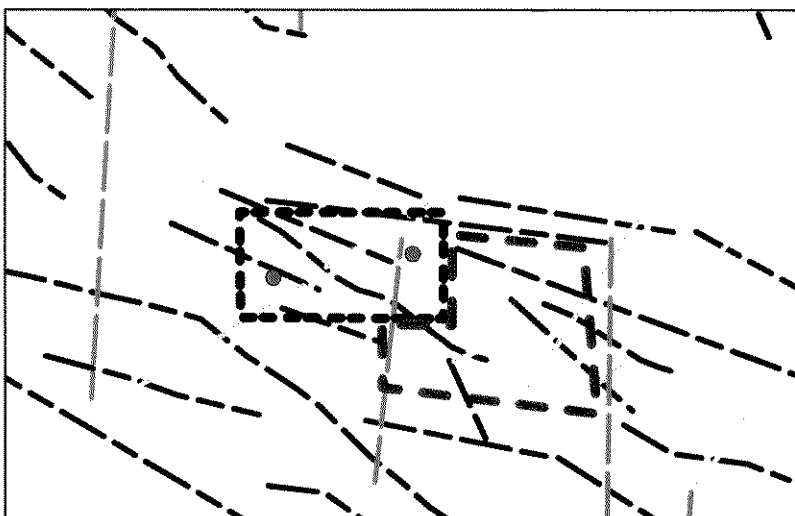


Figura 7. 9. (e) Esquema de lineamentos.

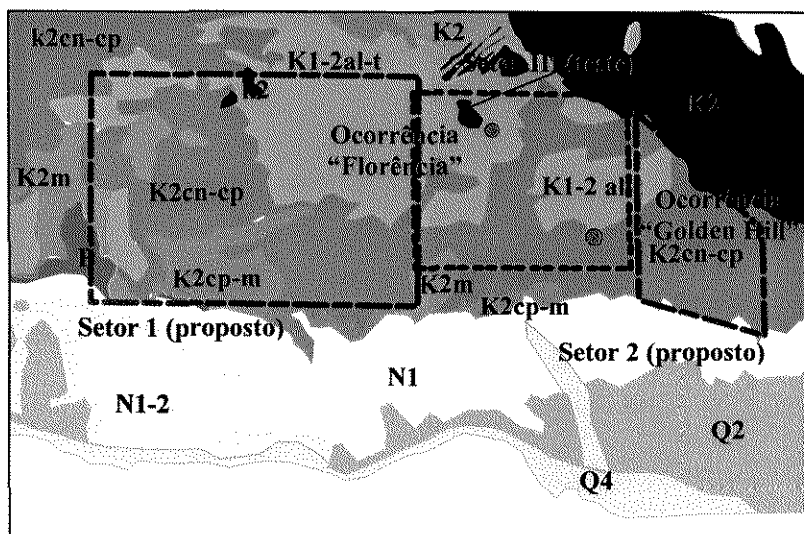


Figura 7. 10. (a) Mapa geológico.

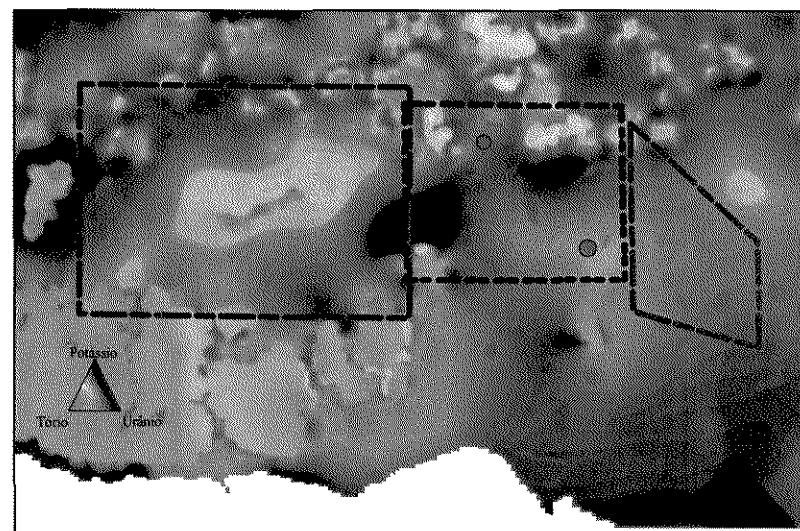
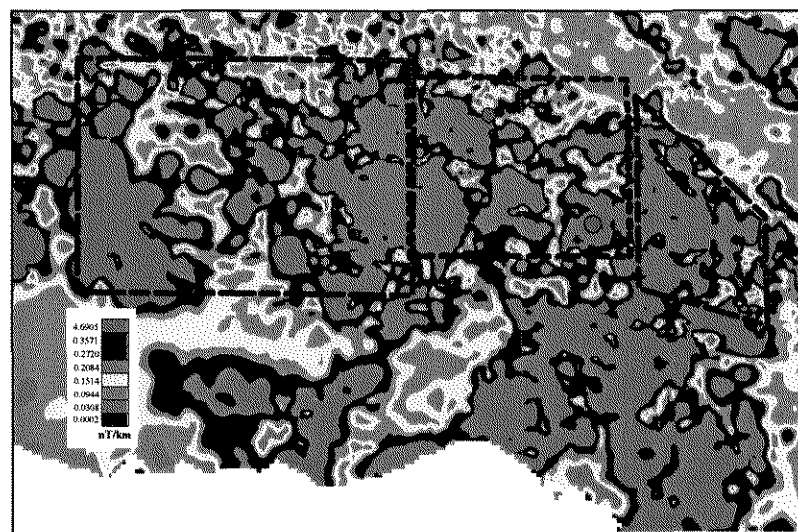


Figura 7. 10. (b) Mapa ternário.



7. 10. (c) Mapa de amplitude de sinal analítico.

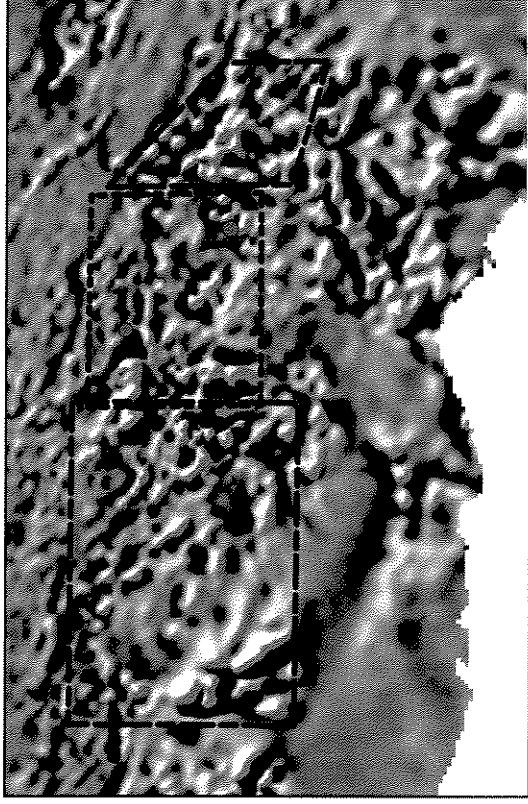


Figura 7.10. (d) Mapa de derivada vertical em Z.

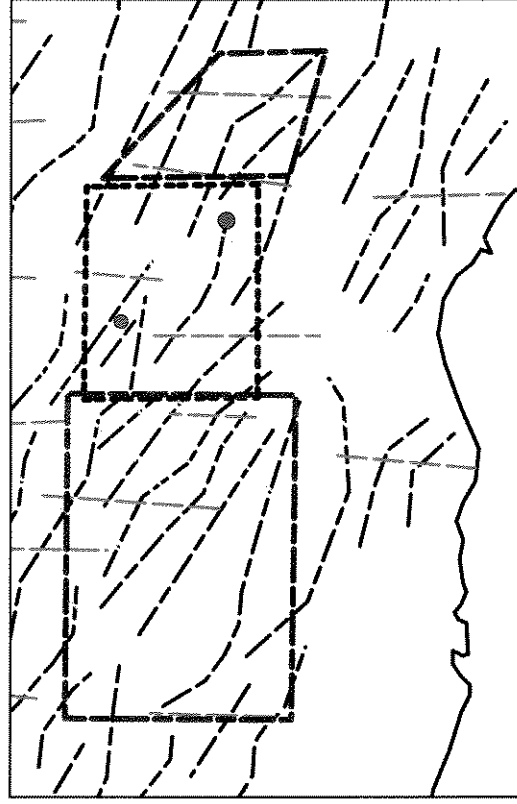


Figura 7.10. (e) Esquema de lineamentos.

7. 4. CONCLUSÕES

A integração de resultados foi realizada de duas formas: (i) a partir da classificação não supervisionada de dados aeromagnéticos, gravimétricos e aerogamaespectrométricos; (ii) a partir da integração dos produtos resultantes da interpretação para cada categoria de dados processada.

A classificação não supervisionada ofereceu os seguintes resultados:

- i) para os dados aeromagnéticos e gravimétricos, a análise de agrupamento mostrou 6 classes, as quais puderam ser relacionadas aos ambientes geológico-tectônicos presentes na área de estudo;
- ii) para os dados gamaespectrométricos, a análise agrupou 8 classes, as quais relacionam-se aos estágios magmáticos do Arco Cretácico e à evolução do cinturão dobrado.

A integração dos produtos resultantes da interpretação para cada categoria de dados processada culminou na confecção do mapa de integração, permitindo a divisão da área de estudo em três faixas geológico-geofísicas:

- i) Faixa A: caracterizada por valores positivos de baixo gradiente dos campos gravimétrico e magnético e concentrações elevadas até anomalias de urânio; representa a porção norte do cinturão dobrado, constituído por sedimentos de idade jurássica-cretácea, pertencentes à margem continental da Plataforma das Bahamas;
- ii) Faixa B: apresenta campo gravimétrico (anomalia de Bouguer) de valores positivos baixos até negativos e altos gradientes, campo magnético anômalo de valores positivos baixos até negativos e intensos gradientes, e gamaespectrometria caracterizada por valores de background dos radioelementos. Esta faixa sofreu o efeito simultâneo de diferentes eventos geotectônicos. A porção oeste da faixa é marcada pela presença de uma possível zona de subdução de direção SW, associada a um arco boninítico extinto. A porção leste, possivelmente compreende bacias de retro-arco dos arcos vulcânicos boninítico e cretácico;
- iii) Faixa C: apresenta campo gravimétrico anômalo de valores positivos e altos gradientes, às vezes de valores negativos e ausência de gradiente. Por sua vez, o campo magnético apresenta geralmente valores positivos variáveis de fortes

gradientes e, ocasionalmente, setores anômalos de valores negativos, localmente intensos, com ausência de gradiente. A gamaespectrometria nesta faixa apresenta uma marcante especialização potássica. Esta faixa é representativa da parte ativa do Arco Vulcânico Cretácico, denominada bacia axial, sendo constituída por corpos plutônicos, sub-vulcânicos e lavas de variada composição.

Pelas características tectôno-estruturais e composição das rochas na área de estudo, os métodos que forneceram os melhores resultados para prospecção de depósitos metálicos foram a magnetometria e a gamaespectrometria (concentrações de potássio). A análise integrada de áreas com potencial para ouro em Cuba Centro-Oriental foi realizada em três setores do arco, com ocorrências conhecidas, os quais foram utilizados como padrão para o mapeamento de novos alvos de prospecção:

- i) Setor I: a mineralização encontra-se relacionada a estruturas vulcânicas de composição principalmente intermediária-ácida, de idade K_2 cp, geradas no cruzamento de uma falha de direção NW com outras de direção NE e N-S, respectivamente. No mapa ternário observa-se, paralelamente à direção das ocorrências minerais, um discreto aumento dos teores de potássio. Os mapas magnéticos processados e o esquema de lineamentos derivado, indicam que as ocorrências minerais relacionam-se à zona de cruzamento de lineamentos de direção NW e NE. A partir dos resultados obtidos, foram propostos dois novos setores com potencial metalogenético, geologicamente localizados em formações de idade K_2 cp, apresentando incremento nos teores de potássio e relacionados a uma estrutura magnética alongada de direção NW, onde são observados cruzamentos de lineamentos de direção NW e NE;
- ii) Setor II: as ocorrências minerais encontram-se nas seqüências vulcânicas (K_2 cp) em contato com quartzo-dioritos, granosienitos e sienitos (K_2). Nas imediações das ocorrências minerais, o mapa ternário mostra um notável incremento das concentrações de potássio. Nos mapas magnéticos, observa-se uma estrutura de direção NW seccionada por outra de direção NE. Uma nova área alvo foi proposta à leste do setor II, compreendendo elevados teores de potássio, e estruturas magnéticas

seccionadas pela continuidade da estrutura magnética de direção NW-SE, observada no setor II;

- iii) Setor III: compreende dois importantes depósitos minerais. O primeiro localiza-se no contato entre as seqüências vulcânicas cretácicas (K₁₋₂ al-t) e um corpo intrusivo granítico. O segundo encontra-se relacionado com a cratera erodida de um antigo vulcão, na área de desenvolvimento de rochas vulcânicas cretácicas (K₂ cn-cp). Observa-se, em todo o setor, um predomínio das concentrações de potássio, destacando-se a presença de estruturas magnéticas vinculadas a possíveis corpos sub-vulcânicos em zonas de cruzamento de falhas. Foram propostas duas áreas com potencial metalogenético, a oeste e leste do setor III, localizadas em formações geológicas caracterizadas por elevados teores de potássio. São observadas também, nestas áreas, uma grande freqüência de cruzamentos de lineamentos de direção NW, SE e ocasionalmente N-S, possivelmente relacionados à estas mineralizações.

7. 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Ando, J.; Harangi, SZ.; Szkámy, BY.; Dosztály, L. 1996. Petrología de la asociación ofiolítica de Holguín. In: *Iturralde-Vinent, M.A. 1994. Cuban Ophiolites and Volcanic Arc. Project 364: Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Terrenes in the Circum Caribbean Realm*, p. 154-178.
- Baranov, V. 1957. A new method for interpretation of aeromagnetic maps: Pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysys.* **22**, 359-383.
- Broome, H. J. 1990. Generation and interpretation of geophysical images with examples from Rea Province, northwestern Canada Shield. *Geophysics*, **55**: 977-997.
- Capote, C. 1999. *Análise do controle estrutural e metalogenético em Cuba Centro-Oriental, com base em dados integrados*. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, Tese de Doutorado, 222 p.
- Cobert G. J. e Leach E. M. 1997. *Southwest Pacific Rim Gold-Copper System: Structure, Alteration and Mineralization*. Short Course Manual, 225 p.

- Crósta, A. 1993. *Processamento Digital de Imagens de Sensoriamento Remoto*, ed. rev. Instituto de Geociências, Unicamp. São Paulo, 170 p.
- Davis, C. D. 1976 *Statistics and Data Analysis in Geology Analysis of Multivariate Data*, 2 ed. USA, John Wiley & Sons, 646p.
- Dickson, B. L. e Scott, K. M. 1997. Interpretation of aerial gamma-ray survey adding the geochemical factor. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics.*, **17**: 187-200.
- Dogliani, C.; Harabaglia, P.; Merlini, S.; Mongelli, F.; Peccerillo, A.; Piromallo, C. 1999. Orogens and slabs vs. their direction of subduction. *Earth Science Reviews*, **45**: 167-208.
- Doyle, H. A. 1990. Geophysical exploration for gold. A review. *Geophysics*, **55**: 134-146.
- Duval, J. S e Vulkan, N, U. 1993. Multivariate statistical analysis of geophysical data in Nevada. *Geophysics.*, **58**: 749-755.
- Eberle, D. 1993. Geological mapping based upon multivariate statistical analysis of airborne geophysical data. *ITC Journal.*, **2**: 173-178.
- Fernandez-Alonso, M e Tahon, A. 1991. Lithological discrimination and structural trends in W-Rwanda (Africa) on images of airborne radiometric and aeromagnetic surveys, corregistered to a Landsat-TM scene. *Photogrammetric Engineer & Remote Sensing*, **57**: 1155-1162.
- Gnojek, I. e Prichstal, A. 1985. A new zinc mineralization detected by airborne gamma-rate spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration.*, **23**: 491-502.
- Grant, F. S. 1985. Aeromagnetic, geology and ore environments. *Geoexploration*, **23**: 303-362.
- Gunn, P. J. 1997. Quantitative methods for interpreting aeromagnetic data: a subjective review. *AGSO Journal*, **17**: 105-113.
- Gunn, P. J. e Dentith, M. C. 1997. Magnetic responses associated with mineral deposit. *AGSO Journal*, **17**: 145-158.
- Harris, J. R. 1989. Clustering of gamma ray spectrometer data using a computer image analysis system. In: Agterberg F. P. & Bonham-Carter G. F. (ed.) *Statistical Application in the Earth Sciences*. Geological survey of Canada, 19-31.

- Iturralde-Vinent, M. A. 1997. Introducción a la Geología de Cuba. *In: Estudios sobre la Geología de Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p.35-68.
- Iturralde-Vinent, M. A.; Stanek, K.; Wolf, D.; Thieke, H. U.; Müller, H. 2000. Geology of the Camaguey Region, Central Cuba Evolution of a Collisional margin in the Northern Caribbean. *In: Miller H. e Hervé F. Zeitschrift für Angewandte Geologie (Geoscientific Cooperation with Latin America-31st International Geological Congress, Rio de Janeiro 2000)*, p.267-273.
- Karner, G. D. e Watts, A. B. 1983. Gravity anomalies and flexure of the lithosphere at mountains ranges. *Journal Geophysics Research*, **88**: 1449-1477.
- Keller, G. R.; Smith, R. A.; Hinze, W. J.; Aiken, C. L. 1985. Regional gravity and magnetic study of west Texas. *Society Exploration Geophysicists*, 198-212.
- Kerr, A. C.; Iturralde-Vinent, M. A.; Saunders A. D.; Babbs, T. L.; Tarney, J. 1999. A new plate tectonic model of the Caribbean: Implications from a geochemical reconnaissance of Cuban Mesozoic volcanic rocks. *Geological Society of American Bulletin*, **11**: 1581-1599.
- Marí, T. M. 1997. Particularidades de los Granitoides de Ciego de Avila-Camaguey-Las Tunas y consideraciones sobre su posición dentro del Arco de Islas. *In: Estudios sobre la Geología e Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p. 399-416.
- Mirónov, V. S. 1977. *Curso de Prospección Gravimétrica*, ed. Reverté, S.A. Barcelona, 525 p.
- Pardo, E. M. 1994. Zonación gravimétrica y modelo físico-geológico conceptual del cinturón doblado cubano. *In: Iturralde-Vinent, M.A. 1994. Cuban Ophiolites and Volcanic Arc. Project 364: Geological Correlation of Ophiolites and Volcanic Terranes in the Circum Caribbean Realm*, Ciudad de la Habana, p.70-83.
- Parks, J. M. 1966. Cluster analysis applied to multivariate geological problems. *Journal Geology*, **74**: 703-715.
- Pérez, P. E.; Pimentel, O. H.; Pardo, E. M. 1998. *Interpretación tectónico-estructural de los datos geofísicos en la región Ciego de Avila-Camaguey-Las Tunas*. Ciudad de La Habana, IGP (Relatório técnico-econômico).

- Pérez, R. M. e Sukar, S. K. 1997. Granitoides del Arco Volcánico Cretácico de la Región Central de Cuba (antigua provincia de Camaguey). In: *Estudios sobre la Geología e Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p.387-398.
- Pindell, J. L.; Cande, S. C.; Pitman III, W. C.; Rowley, D. B.; Dewey, J. F.; Labrecque, J.; Haxby, W. 1988. A plate-kinematic framework for models of Caribbean evolution. *Tectonophysics*, **155**, 121-138.
- Piñero, P. E.; Quintana, M. E.; Marí, M. T. 1997. Caracterización Geológica de los depósitos vulcanógeno-sedimentarios de la región de Ciego-Camaguey-Las Tunas. In: *Estudios sobre la Geología e Cuba*, CNDIG, Ciudad de la Habana, p. 345-356.
- Pires, A. C. B. e Harthill, N. 1989. Statistical analysis of airborne gamma-ray mapping purposes: Crixás-Itapaci area, Brazil. *Geophysics.*, **54**: 10-15.
- Pires, A. C. B. 1990. Statistical characterization of greenstone sequences using magnetic and gamma-ray spectrometric data, Guarinos-Pilar de Goiás, Brazil. *Revista Brasileira de Geociências.*, **20**: 293-298.
- Pirkle, F. L.; Howell, J. A.; Wecksung, G. W.; Duran, B. S. Stablein, N. K. 1984. An example of cluster analysis applied to a large geological data set: aerial radiometric data from Cooper Mountain, Wyoming. *Math Geology.*, **16**: 479-498.
- Portnov, A. M. 1987. Specialization of rocks towards potassium and thorium in relation to mineralization. *International Geology Review.*, **29**: 326-344.
- Sheffels, B. e McNutt, M. 1986. Role of subsurface loads and regional compensation in the isostatic balance of the Transverse Ranges, California: evidence for intracontinental subduction. *Journal Geophysics Research*, **91**: 6419-6431.
- Simon, G.; Kesler, S. E.; Rusell, N.; Hall, C. M.; Bell, D.; Piñero, E. 1999. Epithermal Gold Mineralization in an Old Volcanic Arc: The Jacinto Deposit, Camaguey District, Cuba. *Economic Geology*, **94**: 487-506.
- Somin, M. L. e Millán, G. 1981. *Geología de los complejos metamórficos de Cuba*. Ed. Nauka, Moscú, Rusia.

Tarlowski, C.; Gunn, P. J.; Mackey, T. 1997. Enhancements of the magnetic map of Australia. *AGSO Journal*, 17: 77-82.

Windley, B. F. 1995. Island Arc. In: *The Evolving Continent, 1995*, 3 ed. John Wiley & Sons, England, p. 76-90.

CAPÍTULO 8. CONCLUSÕES

Uma síntese das conclusões obtidas em cada capítulo da tese é apresentada a seguir.

Capítulo 3. Levantamento Aeromagnético de Cuba Centro-Oriental: Processamento e Resultados

i) o espectro de potência mostrou três profundidades estimativas das fontes magnéticas anômalas: (a) infracrustais ~ 10 km; (b) intracrustais ~ 2 km; (c) supracrustais nos primeiros 0,5 km;

ii) a interpretação da distribuição e intensidade do campo magnético anômalo na área de estudo, permitiu a sua separação em 4 domínios magnéticos distintos:

- o **Domínio A**, de valores positivos intensos e alta susceptibilidade, é relacionado a corpos plutônicos de composição intermediária-básica no centro e centro-sul da área de estudo, pertencentes à bacia axial do AVC;
- o **Domínio B**, de valores positivos e susceptibilidade variável, é relacionado a rochas vulcano-sedimentares de composição básica até ácida (que constituem a borda setentrional da bacia axial do arco), e corpos sub-vulcânicos, lavas e tufos de composição variada (pertencentes à bacia axial do arco);
- o **Domínio C**, de valores positivos baixos até negativos e baixa susceptibilidade, é relacionado às seqüências terrígeno-carbonáticas e sedimentos continentais da Plataforma das Bahamas e às seqüências sedimentares derivadas de fontes vulcânicas do arco cretácico;
- o **Domínio D**, de valores negativos e baixa susceptibilidade, é relacionado, a norte, à zona de sutura entre as unidades continental (Plataforma das Bahamas) e oceânica (associação ofiolítica), e a oeste e sul, às bacias também pertencentes ao AVC. Mapas de derivadas e fase do sinal analítico foram de grande relevância na confecção do esquema de lineamentos, no qual foram cartografados os três principais sistemas tectônicos conhecidos no setor: (a) o “Cubano”, mais antigo, de direção NW-SE, relacionado à evolução do cinturão orogênico cubano; (b) o “Camaguey”, de direção NE, responsável

pelos principais eventos modeladores do quadro tectônico-estrutural na área de estudo; e
(c) o “Banao”, mais recente, de direção N-S, vinculado a movimentos oscilatórios fundamentalmente verticais, do neo-autóctone.

iii) A integração do esquema de lineamentos com os mapas processados a partir do campo magnético anômalo resultaram no esquema magneto-estrutural do setor, mostrando 9 domínios, relacionados às principais estruturas e processos da evolução geológico-tectônica do cinturão dobrado em Cuba Centro-Oriental.

Capítulo 4. Gravimetria de Cuba Centro-Oriental: Processamento e Resultados

i) o espectro de potência mostrou profundidades estimativas das fontes gravimétricas:
(a) infracrustais ~15 km; (b) intracrustais entre 2,5-4 km; (c) supracrustais ~ 0,5 km;

ii) o mapa de domínios gravimétricos foi confeccionado a partir dos mapas de anomalias gravimétricas de *Bouguer* e com continuação para cima (4.000m e 15.000m). Três domínios foram individualizados:

- o **Domínio A** compreende valores positivos, localmente intensos, sendo relacionado a fontes anômalas profundas e constituído por rochas de alta densidade. Este domínio foi associado, a norte da área de estudo, à unidade geotectônica continental Plataforma das Bahamas (embasamento metamórfico da margem continental) e ao centro e ao sul, à corpos pertencentes ao magmatismo-plutônico de composição intermediária-básica do AVC;
- o **Domínio B**, de valores intermediários, é relacionado, a norte, com sedimentos de densidade média, de natureza continental (Plataforma das Bahamas) e oceânica (associação ofiolítica). No restante da área de estudo, é associado a rochas magmáticas e vulcâno-sedimentares de composição variada do AVC;
- o **Domínio C**, de valores negativos, é relacionado a grandes espessuras de sedimentos de baixa densidade, pertencentes às bacias formadas durante a orogenia do AVC;

iii) A integração dos mapas processados e interpretados resultou no esquema de interpretação gravi-estrutural, no qual foram determinados 6 domínios, relacionados às principais

estruturas e processos da evolução geológico-tectônica do cinturão dobrado em Cuba Centro-Oriental.

Capítulo 5. Levantamento Aerogamaespectrométrico de Cuba Centro-Oriental: Processamento e Resultados

i) a gamaespectrometria mostrou-se um método eficaz no mapeamento geológico da área, permitindo discernir, a partir dos radioelementos, rochas pertencentes ao substrato dobrado daquelas pertencentes a neo-autóctone;

ii) as áreas com maior contribuição de elementos radioativos em Cuba Centro-Oriental encontram-se nas porções norte, noroeste, central e sul do setor;

iii) setores que apresentam maiores concentrações de urânio, relacionam-se a coberturas cenozóicas do neo-autóctone, sedimentos continentais fosfatados da Plataforma das Bahamas e afloramentos de corpos plutônicos do AVC;

iv) o tório apresenta os maiores contrastes, em extensas áreas relacionadas ao desenvolvimento de crostas lateríticas sobre seqüências cenozóicas do neo-autóctone;

v) o potássio mostra concentrações relacionadas a rochas do substrato dobrado, vinculadas às séries magmáticas plutônica e vulcânicas do arco vulcânico cretácico;

vi) a integração dos radioelementos no mapa ternário mostrou que, de forma geral, existe um predomínio das concentrações de potássio sobre as de tório e urânio, o que permite considerar este radioelemento como responsável pela especialização radiogeoquímica no setor;

vii) a aplicação da técnica de normalização de potássio segundo o tório diferenciou setores com contribuição de um radioelemento em relação ao outro, separando setores com predomínio de potássio vinculados a rochas pertencentes a substrato dobrado, daqueles com predomínio de tório relacionadas ao neo-autóctone. Esses resultados sugerem que o potássio e tório foram radioelementos incompatíveis (antagonismo Th-K) ao longo da evolução geológica de Cuba Centro-Oriental;

viii) a análise por principais componentes mostrou resultados interessantes no setor, destacando-se o potássio pela sua contribuição na segunda principal componente, como radioelemento responsável pelas características radiogeoquímicas na área.

Capítulo 6. Modelagem 2-D de Dados Gravimétricos e Aeromagnéticos

i) o ajuste dos modelos gravi-magnéticos permitiu a separação entre as unidades arco vulcânico-associação ofiolítica, e a distinção destas unidades oceânicas da unidade continental da Plataforma das Bahamas;

ii) com base no modelo foi possível identificar, no AVC, a presença da suíte granítica e diferencia-la do complexo vulcano-sedimentar;

iii) a partir das características e posterior ajuste do campo gravimétrico, foi possível inferir a existência de fácies na suíte granítica do AVC;

iv) o ajuste do campo magnético, conjuntamente com o gravimétrico, permitiu a diferenciação de diversos tipos de rochas compreendidas no complexo vulcano-sedimentar do AVC;

v) o modelo magnético foi útil no mapeamento de rochas distintas da associação ofiolítica;

vi) pelas características dos campos físicos, foi possível inferir a existência de um corpo plutônico de composição intermediária-básica do AVC.

Capítulo 7. Análise Integrada de Resultados e Mapeamento de Áreas com Potencial Mineral

i) a integração de resultados foi realizada de duas formas:

- classificação não supervisionada de dados aeromagnéticos, gravimétricos e aerogamaespectrométricos;
- integração dos produtos resultantes da interpretação para cada categoria de dados processada.

ii) a classificação não supervisionada forneceu os seguintes resultados:

- para os dados aeromagnéticos e gravimétricos, a análise de agrupamento forneceu 6 classes, as quais puderam ser relacionadas aos ambientes geológico-tectônicos presentes na área de estudo;
 - para os dados gamaespectrométricos, a análise agrupou 8 classes, as quais relacionam-se aos estágios magmáticos do Arco Cretácico e à evolução do cinturão dobrado.
- iii) a integração dos produtos resultantes da interpretação para cada categoria de dados processada possibilitou a confecção do mapa de integração, permitindo a divisão da área de estudo em três faixas geológico-geofísicas:
- **Faixa A:** caracterizada por valores positivos de baixo gradiente dos campos gravimétrico e magnético e concentrações elevadas até anomalias de urânio. Representa a porção norte do cinturão dobrado, constituído por sedimentos de idade jurássica-cretácea, pertencentes à margem continental da Plataforma das Bahamas;
 - **Faixa B:** apresenta um campo gravimétrico (anomalia de Bouguer) de valores positivos baixos até negativos e altos gradientes, campo magnético anômalo de valores positivos baixos até negativos e intensos gradientes, e gamaespectrometria caracterizada por valores de background dos radioelementos. Esta faixa sofreu o efeito simultâneo de diferentes eventos geotectônicos. A porção oeste da faixa é marcada pela presença de uma possível zona de subdução de direção SW, associada a um arco boninitico extinto. A porção leste, possivelmente compreende bacias de retro-arco dos arcos vulcânicos boninitico e cretácico;
 - **Faixa C:** o campo gravimétrico anômalo exhibe valores positivos e altos gradientes e, localmente, valores negativos e ausência de gradiente. Por sua vez, o campo magnético apresenta geralmente valores positivos variáveis de fortes gradientes e, ocasionalmente, setores anômalos de valores negativos localmente intensos, com ausência de gradiente. A gamaespectrometria nesta faixa apresenta uma marcante especialização potássica. Esta faixa é representativa da parte ativa do Arco Vulcânico Cretácico, denominada bacia axial, sendo constituída por corpos plutônicos, sub-vulcânicos e lavas de variada composição.

iv) pelas características tectôno-estruturais e composição das rochas na área de estudo, os métodos que forneceram os melhores resultados para prospecção de depósitos metálicos foram a magnetometria e a gamaespectrometria (concentrações de potássio).

v) a análise integrada de áreas potenciais de ouro em Cuba Centro-Oriental, foi realizada em três setores do arco com ocorrências conhecidas, os quais foram utilizados como padrão para a obtenção de resultados:

- **Setor I:** a mineralização encontra-se relacionada a estruturas vulcânicas de composição principalmente intermediária-ácida de idade K_2 cp, geradas no cruzamento de uma falha de direção NW com outras de direção NE e N-S, respectivamente. No mapa ternário observa-se, paralelamente à direção das ocorrências minerais, um discreto aumento dos teores de potássio. Neste setor, o esquema de lineamentos, obtido a partir dos mapas magnéticos processados, indica que as ocorrências de ouro relacionam-se à zona de cruzamento de lineamentos de direção NW e NE. Duas novas áreas com potencial metalogênico foram propostas neste setor; estas áreas compreendem formações de idade K_2 cp, apresentam incremento nos teores de potássio, e relacionam-se a uma estrutura magnética alongada de direção NW, onde são observados cruzamentos de lineamentos de direção NW e NE;
- **Setor II:** as ocorrências minerais encontram-se nas seqüências vulcânicas (K_2 cp), em contato com quartzo-dioritos, granosienitos e sienitos (K_2). Nas imediações das ocorrências minerais, o mapa ternário mostra um notável incremento das concentrações de potássio. Nos mapas magnéticos observa-se uma estrutura de direção NW, seccionada por outra de direção NE. Foi proposta uma nova área de interesse a leste do setor II, com elevados teores de potássio e associada a estruturas magnéticas também seccionadas pela continuidade da estrutura magnética de direção NW-SE, observada no setor II;
- **Setor III:** compreende dois importantes depósitos minerais. O primeiro localiza-se no contato entre as seqüências vulcânicas cretácicas (K_{1-2} al-t) e um corpo intrusivo granítico. O segundo encontra-se relacionado com a cratera erodida de um antigo vulcão, numa área onde afloram rochas vulcânicas cretácicas

(K₂ cn-cp). Observa-se, em todo o setor, um predomínio das concentrações de potássio, destacando-se a presença de estruturas magnéticas vinculadas a possíveis corpos sub-vulcânicos em zonas de cruzamento de falhas. Foram propostas duas áreas com potencial metalogenético a oeste e leste do setor III, localizadas em formações geológicas caracterizadas por elevados teores de potássio. São observadas também, nestas áreas, uma grande freqüência de lineamentos de direção NW, SE e ocasionalmente N-S, os quais possivelmente relacionam-se a estas mineralizações.