

EDUARDO MEZZOMO

**INTEGRAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA
CARACTERIZAÇÃO DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO 3D NA
PORÇÃO CENTRO-LESTE DA BACIA DO PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geologia, Curso de Pós-Graduação em Geologia Exploratória, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla

CURITIBA

2007

EDUARDO MEZZOMO

**INTEGRAÇÃO DE MODELOS NUMÉRICOS PARA
CARACTERIZAÇÃO DO ARCABOUÇO GEOLÓGICO 3D NA
PORÇÃO CENTRO-LESTE DA BACIA DO PARANÁ**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Geologia, Curso de Pós-Graduação em Geologia Exploratória, Departamento de Geologia, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Sidnei Pires Rostirolla

CURITIBA

2007

Mezzomo, Eduardo

Integração de modelos numéricos para caracterização do arcabouço geológico 3D na porção centro-leste da Bacia do Paraná / Eduardo Mezzomo. - Curitiba, 2007.

x, 87 f.: il., mapas

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geologia.

Orientador: Sidnei Pires Rostirolla.

1. Modelagem geológica – Imagem tridimensional – Bacia do Paraná, I. Rostirolla, Sidnei Pires. II. Título.

CDD 22 551.41

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	IV
ÍNDICE DE TABELAS	VI
LISTA DE ABREVIATURAS	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FIOGRÁFICOS	2
2 OBJETIVOS	5
3 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA BACIA DO PARANÁ	5
3.1 CONTEXTO MORFOESTRUTURAL DA BACIA DO PARANÁ	7
3.2 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO	12
3.2.1 Grupo Rio Ivaí	12
3.2.2 Grupo Paraná	13
3.2.3 Grupo Itararé	13
3.2.4 Grupo Guatá	14
3.2.5 Grupo Passa Dois	14
3.2.6 Grupo São Bento e Formação Pirambóia	15
4 MÉTODOS EMPREGADOS NA ANÁLISE MULTI-ESCALA	15
4.1 INTERPRETAÇÃO POR SENSORES REMOTOS	16
4.1.1 Interpretação em imagens SRTM	16
4.1.2 Interpretação em imagens Landsat 7 ETM+	20
4.1.3 Interpretação em mapas de contorno estrutural	23
4.1.4 Interpretação em mapas aeromagnetométricos	28
4.1.5 Interpretação em imagens em escala de detalhe (1:10.000)	35
4.1.6 Aplicação do Laser Scanner na interpretação e modelagem tridimensional de afloramentos	38
4.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO	45
5 MODELAGEM ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL EM AMBIENTE PETREL ..	49
5.1 SEQÜÊNCIA BÁSICA DE PROCEDIMENTOS PARA MODELAGEM GEOLÓGICA NO PETREL	49
5.2 IMPORTAÇÃO DE DADOS EM PETREL	50
5.2.1 Dados Culturais	51
5.2.2 Importação de imagens	54
5.2.3 Poços Reais	56
5.2.4 Poços virtuais	59
5.3 GERAÇÃO DE MODELOS SÓLIDOS VOLUMÉTRICOS NO PETREL	61
5.3.1 Geração de pasta para modelos	61
5.3.2 Criação de cercas de fraturas ou falhas	62
5.3.3 Geração do esqueleto do modelo	62
5.3.4 Criação de horizontes estratigráficos	63
5.3.5 Atribuição de informações às unidades	64
5.4 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DAS ÁREAS DE ESTUDO	65
5.4.1 Área regional	65
5.4.2 Modelagem 3D da Área de semidetalhe (Prudentópolis)	70
5.4.3 Área de detalhe (Morro do Jacaré)	74
6 DISCUSSÕES	79
7 CONCLUSÕES	82
8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Localização das áreas de estudo.....	3
Figura 2 – Mapa do estado do Paraná com divisões geomorfológicas indicando a área regional. (modificado de Maack, 1968)	3
Figura 3 – Aspecto das cachoeiras na região estudada, Salto São Francisco, com 196 metros de altura.....	4
Figura 4 – Feição fisiográfica conhecida como Morro do Jacaré, próximo à cidade de Tibagi – PR (visão para Oeste).	4
Figura 5 - Mapa de localização das principais bacias intracratônicas da Plataforma Sul-americana (adaptada de Milani & Thomaz Filho, 2000).....	7
Figura 6 - Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná.	8
Figura 7 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná (mod. Paulipetro, 1981).	10
Figura 8 – Coluna crono-litoestratigráfica da Bacia do Paraná (Milani <i>et al.</i> , 1994). .	11
Figura 9 – Mapa geológico indicando as áreas de estudo: regional (retângulo preto), de semidetalhe (retângulo amarelo) e de detalhe (retângulo vermelho) (DNPM, 1989).	16
Figura 10 – Imagem SRTM pré-processada, indicando a área regional (retângulo maior) e a área utilizada como exemplo na Figura 11 representada pelo quadrado menor.	17
Figura 11 – Modelos digitais de elevação de uma porção no nordeste da área. (A) iluminação com azimute 0°, (B) iluminação com azimute 90°, (C) iluminação com azimute 45° e (D) iluminação com azimute 315°.	18
Figura 12 – Imagem SRTM indicando área de estudo regional e principais lineamentos interpretados.	19
Figura 13 – Lineamentos sobrepostos a imagens Landsat 7 ETM+ indicando a área regional. À direita, combinação de bandas 543 e a esquerda 854.....	21
Figura 14 – Lineamentos detalhados em imagens Landsat (direita), a partir do traçado em SRTM (esquerda), na porção nordeste da área.	22
Figura 15 – Principais lineamentos interpretados (SRTM /Landsat), sobrepostos ao mapa geológico (DNPM, 1989).	23
Figura 16 – Mapas de contorno estrutural dos topos aflorantes das unidades geológicas da área de estudo..	25
Figura 17 – Mapa de contorno estrutural geral da área, gerado a partir da sobreposição de todos os contornos estruturais.	25
Figura 18 - Esquema geral demonstrando a geração do mapa de contorno estrutural reconstituído do horizonte fantasma ao nível da Formação Palermo.....	27
Figura 19 - Mapa de contorno estrutural reconstituído do horizonte fantasma ao nível da Formação Palermo.	27
Figura 20 – Traçado final dos lineamentos SRTM/Landsat (Preto) sobrepostos ao mapa de contorno estrutural e interpretações complementares (Vermelho).	28
Figura 21 – Mapa magnetométrico original.	29
Figura 22 – Mapas aeromagnetométricos utilizados.	31
Figura 23 – Mapa magnetométrico original da área, sobreposto aos lineamentos definidos por Zalán <i>et al.</i> (1990).....	32
Figura 24 – Mapa magnetométrico original da área sobreposto as interpretações magnéticas finais.....	33
Figura 25 – Lineamentos interpretados em imagens SRTM/Landsat, sobrepostos a lineamentos magnéticos.....	34

Figura 26 – Interpretação dos lineamentos magnéticos com ou sem correlatos em superfície.....	34
Figura 27 - Mapa de localização da área do Morro do Jacaré próximo da cidade de Tibagi. (mod. do mapa rodoviário do Paraná, DNER, 2001).	35
Figura 28 – Visualização tridimensional em PETREL da fotografia aérea 1:10.000 do Morro do Jacaré, sobreposto ao Modelo Digital de Elevação (MDE), com a interpretação dos lineamentos em rosa na superfície do morro.....	37
Figura 29 - Área de recobrimento das varreduras (1 Norte, 2 Sul) com o equipamento Laser Scanner.	39
Figura 30 - Locais do posicionamento do equipamento Laser Scanner (<i>ScanWorld</i>) e as nuvens de pontos obtidas.....	40
Figura 31 - Modelo tridimensional do Morro do Jacaré (visão superior).....	40
Figura 32 - Modelos tridimensionais do Morro do Jacaré (visão de NE para SW). ...	41
Figura 33 - Modelos tridimensionais do Morro do Jacaré (visão de SW para NE). ...	42
Figura 34 - Planos de fraturas de direção NE. Representação da intensidade de retorno do laser.	43
Figura 35 - Representação tridimensional de uma porção contendo planos de falhas escalonadas.	43
Figura 36 - Detalhe de plano de falha escalonado, cujos indicadores cinemáticos sugerem movimentação oblíqua dextral.....	44
Figura 37 – Imagem 3D da porção sul da cunha do Morro do Jacaré, com interpretações de camadas sedimentares em cinza.	44
Figura 38 – Mapa de afloramentos descritos.....	45
Figura 39 – Exemplos de falhas e fraturas observadas em campo.....	47
Figura 40 – Mapa geológico da região de Prudentópolis. Lineamentos interpretados, pontos de campo e diagramas de roseta sobrepostos.	48
Figura 41 - Diagrama de rosetas obtido com atitudes verificadas nos afloramentos na área de detalhe.	48
Figura 42 - Janela do <i>Explorer</i> de Processos a esquerda, demonstrando o caminho para a janela de geração de superfícies e inserção de parâmetros para a interpolação.....	52
Figura 43 - Exemplo de edição de picos anômalos em superfícies.....	52
Figura 44 - Caixas de diálogos de operações matemáticas disponíveis para execução em dados vetoriais ou superfícies.....	53
Figura 45 – Janela do procedimento de atribuição de coordenadas às imagens inseridas em PETREL.	55
Figura 46 – Mapa geológico da área de estudo carregado em ambiente PETREL...55	55
Figura 47 - Pasta <i>Well tops</i> , específica para informações qualitativas em poços com suas subdivisões, parâmetros de configuração e horizonte estratigráfico criado.	57
Figura 48 – Planilha interna ao PETREL, demonstrando poços inseridos, seus nomes, unidades, coordenadas e topo de cada formação, em cota e profundidade.	57
Figura 49 – Inserção e subdivisão de zonas internas as unidades estratigráficas. ...	58
Figura 50 - Edição em planilha eletrônica de poços virtuais que simulam o contato entre unidades extraídas de mapas geológicos.	60
Figura 51 – Associação das colunas correspondentes do arquivo ASCII, com os atributos necessários para o carregamento de poços em PETREL.....	60
Figura 52 – Modelo estrutural definido no item <i>define model</i>	61

Figura 53 - Esqueleto (topo, meio e base) diretamente relacionado com as falhas interpretadas.	63
Figura 54 – Visualização em PETREL das superfícies geradas, poços e base da bacia.....	66
Figura 55 – Esqueleto da área de estudo regional, seccionado por planos de fraturas/falhas.....	67
Figura 56 – Horizontes criados sobre a influência dos principais lineamentos da área.	68
Figura 57 – Modelo tridimensional da área de estudo regional..	69
Figura 58 – Mapa geológico da área de semidetalhe com sobreposição dos lineamentos interpretados e pontos de campo.....	71
Figura 59– Esqueleto da área de Prudentópolis seccionada pelos planos de fraturas/falhas.....	71
Figura 60 – Diagramas 3D da área de semidetalhe com exagero vertical de 5x. (A), (B), (C) e (D) diagramas em cerca, com prováveis falhas, (E) diagrama 3D com perfis esquemáticos, (F) bloco diagrama 3D com mapa geológico.....	72
Figura 61 – Modelo tridimensional volumétrico da área de Prudentópolis.	73
Figura 62 - A esquerda interpretação de superfícies (preto) em PETREL e a direita interpretação de superfícies (cinza) em CYCLONE.	74
Figura 63 - Superfícies geradas a partir da interpretação sobre os dados LIDAR.....	75
Figura 64 - MDE do Morro do Jacaré sobreposto com fotografia aérea em escala 1:10.000, a superfície e os planos de falhas gerados em PETREL.	75
Figura 65 - Planos de fraturas extrapolados em subsuperfície com nuvens de pontos.	76
Figura 66 - MDE sobreposto às nuvens de pontos laser cortados por superfícies e planos de fraturas.....	77
Figura 67 - Camadas interpretadas nos pontos de Laser Scanner, cortadas por planos de fraturas.....	77
Figura 68 - Modelo volumétrico 3D da área do Morro do Jacaré.....	78

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Planilha com pontos obtidos em cada <i>ScanWorld</i>	40
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS

ASCII – *American Standard Code for Information Interchange*

BPR – Bacia do Paraná

CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral

E – Leste

ETM+ – *Enhanced Thematic Mapper Plus*

IMAGE – Imageamento 3D e Arquitetura de Elementos Essenciais de Sistemas Petrolíferos

I-RB/P – Irati-Rio Bonito/Prambóia

LIDAR – *Light Detection and Ranging*

MDE – Modelo Digital de Elevação

Mod. – Modificado

MODRES – Modelagem de Potenciais Reservatórios Fraturados em Superfície

N – Norte

NE – Nordeste

NNE – Nor-Nordeste

NNW – Nor-Noroeste

NW – Noroeste

PG-I – Ponta Grossa-Itararé

PR – Paraná

RKT – *Real-Time Kinematic*

S – Sul

SE – Sudeste

SP – Sistema Petrolífero

SPHERA – Simulação de Processos Hidrodinâmicos em Reservatórios Análogos na Bacia do Paraná

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SSE – Su-Sudeste

SSW – Su-Sudoeste

SW – Sudoeste

UTM – *Universal Transverse Mercator*

W – Oeste

WGS – *World Geographic System*

RESUMO

A modelagem numérica e a representação tridimensional de feições estruturais em seções sedimentares têm sido desenvolvidas com a utilização de inúmeros dados exploratórios. Devido à escassez de dados de poços e linhas sísmicas, informações obtidas em sensores remotos e afloramentos tornam-se artefatos de suma importância nestas representações. O presente trabalho apresenta as principais técnicas utilizadas para geração de modelos geométricos tridimensionais de feições estruturais, extrapolados de superfície para subsuperfície, em uma área com aproximadamente 19.500 km². Tal região abrange uma faixa aflorante da Bacia do Paraná, compreendendo unidades geológicas do Devoniano ao Cretáceo, onde foram selecionadas duas subáreas (Prudentópolis e Morro do Jacaré), nas quais realizaram-se trabalhos de semidetalhe e detalhe, respectivamente. Inicialmente, informações foram coletadas e organizadas de forma a gerar um banco de dados georreferenciado, composto por mapas geológicos e geofísicos, imagens de satélite, lineamentos interpretados, perfis de poços, dados de Laser Scanner, informações de campo e modelos digitais de elevação, os quais visaram representar as estruturas presentes nas áreas e suas compartimentações morfoestruturais. No estudo das principais feições morfotectônicas da área desenvolveu-se uma análise em multi-escala. As principais feições lineares foram interpretadas em uma escala de 1:300.000 em ambiente ArcMap™ (ArcView 8.3), utilizando modelos de elevação com resolução de 90 metros (SRTM 90 - *Shuttle Radar Topography Mission*) com falsas iluminações de direções com azimutes 0°, 45°, 90° e 315°. Visando refinar o primeiro traçado, utilizou-se imagens LandSat 7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), que permitem uma visualização média de 1:75.000, obtendo-se uma gama de fragmentos lineares interpretados, que foram filtrados e unidos. Com o intuito de gerar um modelo estrutural geral da área regional, foram confeccionados e interpretados diversos mapas magnetométricos e mapas de contorno estruturais das seções aflorantes. Para a coleta de informações utilizadas na modelagem, e ainda, sobre o comportamento estrutural da área, desenvolveram-se trabalhos de campo, coletando-se informações sobre mergulhos, direções, tipologia e cinemática ao longo dos diversos alinhamentos previamente interpretados. Realizou-se levantamento tridimensional de afloramento, para o Morro do Jacaré, com um Laser Scanner modelo Leica HDS3000. Com os dados obtidos, filtrados e preparados, possibilitou-se a coleta de informações estruturais locais, tais como direção e mergulho de planos de fraturas e de lineamentos. Na modelagem tridimensional, os diversos dados coletados durante as primeiras etapas foram inseridos em ambiente PETREL™. A integração destas informações objetivou a modelagem das feições estruturais com a geração de diversos ensaios 3D para as três áreas de estudo. O carregamento de perfis de poços disponíveis permitiu que as unidades geológicas fossem posicionadas em subsuperfície, gerando modelos tridimensionais lito-estruturais para cada área. Deste modo, em ambiente PETREL™, a inserção de dados estruturais, bem como de mapas, modelos de elevação, dados de poços e dados de Laser Scanner, possibilitou a configuração de parâmetros para a visualização tridimensional das áreas de estudo nas três diferentes escalas.

ABSTRACT

The numerical modeling and three-dimensional representation of structural features in sedimentary sections has been developed using many exploratory data. Due to the lack of well data and seismic lines, informations obtained in remote sensors and outcrops became highly important tools for these representations. This work presents the main technique utilized for generating 3D geometric models of structural features, taking surface data and surpassing it to subsurface into an area with almost 19.000 km². This region has an outcropping area in Paraná Basin comprehending geological units ranging from the Devonian to Cretaceous period. Within this area were chosen two smaller regions (Prudentópolis and Morro do Jacaré), in which were realized studies of semi-detail and detail respectively. Initially, informations were collected and organized generating a georeferenced data base, composed of geological and geophysical maps, satellite images, interpreted alignments, well profiles, Laser Scanner data, outcrop informations and digital elevation models, which sought to represent the present structures in the three areas and their morph-structural compartmentations. In the study of the principals morph-tectonic features, a multi-scale analysis was developed. The main linear features were interpreted in 1:300.000 scale, using the software ArcMap™ (ArcWiew 8.3) and elevation models with 90 meters resolution (SRTM 90 - Shuttle Radar Topography Mission) with illumination coming from four different directions: 0°, 45°, 90°, 315°. Seeking to refine the first tracing, LandSat 7 ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) images were utilized, that allowed a visualization of 1:75.000, obtaining a wide range of interpreted linear fragments that were filtered and combined. Aiming to generating a broad structural model of the regional area, many magnetometric maps and structural contour maps of the outcropping sections were made and interpreted. In the gathering of informations utilized at the modeling stage, field trips were developed, acquiring dip, strike, typology and kinematics data along the diverse alignments previously interpreted. A three-dimensional outcrop survey was made for the Morro do Jacaré area, utilizing a Leica laser scanner, model HDS3000. With the filtering and preparing of the gathered data, was possible to collect local structural information, such as strike and dip from fractures plains and alignments. In the first stages of the three-dimensional modeling, the collected data has been inserted in Petrel™ environ. The integration of these informations meant to model the structural features, generating diverse 3D trials for the three study areas. The insertion of available well profiles, allowed locating the geologic units in subsurface, generating three-dimensional litho-structural models for each area. Thus, using the software Petrel™, the insertion of structural data, as well as maps, elevations models, well and laser scanner data, made possible the configuration of parameters for the three-dimensional visualization of the study areas in the three different scales.

AGRADECIMENTOS

No decorrer da confecção do presente trabalho, muitas foram as pessoas que vieram, das mais diversas formas, a colaborar com o desenvolvimento deste. A todos de um modo geral, e a alguns, em particular, registro o meu agradecimento.

Ao Departamento de Geologia da Universidade Federal do Paraná, que possibilitou a realização deste trabalho. Em especial, à Prof^a. Eleonora M. G. Vasconcellos e ao Prof^o. Dr. Francisco J. F. Ferreira

Ao mestre Prof^o. Dr. Sidnei Pires Rostirolla, orientador do presente trabalho, tutor e amigo, pela confiança em minha proposta de pesquisa, pelos ensinamentos na arte da geologia, pelo companheirismo, por sua amizade.

Ao Prof^o. MSc. Fernando Mancini, pelos diversos conselhos, correções e discussões, por sua extrema rigidez nas revisões, por sua atuação como um co-orientador do presente trabalho.

Aos integrantes dos projetos MODRES, IMAGE e SPHERA: Adriane Fátima de Campos, Álvaro Muriel Lima Machado, André Ramiro, Ary Gustavo Candido, Bárbara Trzaskos, Fernando Farias Vesely, Luciane Bergamin Bocardi, Marcelo Kulevicz Bartoszec, Rodrigo Brunetta, Tais Borba Santos e Tiago de Bitencourt Rossi, agradeço por suas contribuições para o desenvolvimento de diversas partes desta pesquisa.

Aos meus familiares: Claci Annoni Pinto, Gervásio Mezzomo, Roberto Mezzomo e Gabriela Mezzomo, que mesmo longe, sempre me apoiaram e incentivaram nas mais diferentes escolhas.

Ao geólogo, amigo e colega de Petrobras MSc. Ronaldo Paulo Kraft, que prontamente respondeu e colaborou em todas as minhas solicitações, desde o início da pesquisa.

A Simone K. Cetolin, companheira, amada, que durante este período sempre me apoiou nas mais diversas situações.

1 INTRODUÇÃO

O trabalho em questão foi desenvolvido no âmbito do projeto *SPHERA – Simulação de Processos Hidrodinâmicos em Reservatórios Análogos na Bacia do Paraná*, financiado pela Finep/Petrobras, visa simular propriedades hidrodinâmicas em modelos 2D e 3D de reservatórios fraturados. Os dados utilizados, de afloramentos análogos e reservatórios em subsuperfície foram manipulados em modelos bi e tridimensionais. Propondo-se que os modelos gerados da representação tridimensional do arcabouço sejam utilizados em simulação de fluxo de fluidos.

Reservatórios análogos vêm sendo utilizados na geologia do petróleo e hidrogeologia, como ferramentas de estudos para se estimar e obter dados de propriedades petrofísicas, bem como informações quanto ao comportamento estrutural. A partir destes, são efetuadas correlações e atribuídos valores para reservatórios com pouca gama de informações.

O propósito deste trabalho foi empregar e compreender diversos métodos para a construção de modelos geológicos tridimensionais em multi-escala, disponibilizando ensaios para possíveis análises estruturais e simulações de fluxo, utilizando diferentes técnicas disponíveis em geologia. Optou-se pela escolha de três áreas de estudo, denominadas arbitrariamente de regional, de semidetalhe e de detalhe, situadas na borda leste da Bacia do Paraná, no estado do Paraná, onde ocorre uma seqüência de rochas aflorantes de idades devonianas até cretáceas.

Estruturalmente, a área apresenta-se segmentada por grandes feições tectônicas. Zalán *et al.* (1990), definiu estes lineamentos como sendo: Zona de Falha Cândido Abreu / Campo Mourão, Lineamento do Rio Piquiri e Lineamento do Rio Alonzo de direção NW – SE; Zona de Falha de Taxaquara na direção NE – SW; e Soares (1982), interpretou outras oito faixas estruturais, sendo três na direção NE – SW, três na direção NW – SE, uma na direção NNW – SSE e uma na direção NNE – SSW.

Conforme Rostirolla *et al.* (2003), sistemas de falhas, associadas a lineamentos, interpostas em zonas de cruzamento, apresentam uma deformação particionada e recorrente, onde compartimentos estruturais com características retangulares condicionam a migração de fluidos por longas distâncias. Localmente, a

deformação cisalhante é responsável pela reorganização de propriedades petrofísicas na seção sedimentar, levando à variação nas unidades locais de fluxo.

O método empregado nas etapas realizadas bem como sua apresentação e discussão partiram de uma metodologia “zoom”, que iniciou com escalas regionais e finalizou com levantamentos de detalhe em escala de afloramento. Visando a confecção de modelos geológicos numéricos tridimensionais utilizou-se principalmente o Software PETREL 2004 (*Copyright* © 1998-2004, Schlumberger). Foram utilizados primeiramente métodos indiretos (sensores remotos) como SRTM, imagens de satélite Landsat 7 ETM+, Modelo Digital de Elevação – MDE, mapas magnetométricos, mapas de contorno, fotografias aéreas e levantamento à Laser Scanner e métodos diretos como trabalhos de detalhe em afloramentos.

1.1 LOCALIZAÇÃO E ASPECTOS FISIAGRÁFICOS.

A área regional envolve aproximadamente 19.500 km². Localizada entre as coordenadas UTM (WGS-84, Zona 22 Sul) 430.000/7.190.000 e 625.000/7.290.000, ou coordenada geográfica -51°36’/-25°24’ -49°46’/-24°30’. Abrange os municípios de Ponta Grossa em seu extremo leste, Guarapuava a oeste, Manuel Ribas a noroeste, Ipiranga, Ivaí e Prudentópolis no centro, entre outras cidades.

Como vias de acesso à área, no sentido leste-oeste têm-se as rodovias PR 487 e a BR 277 e BR 373. De sul para norte, nas proximidades da cidade de Ponta Grossa, o acesso ocorre pela BR 376 e na de cidade de Guarapuava, pela PR 466.

A análise multi-escala exigiu, primeiramente, a escolha de uma área regional, no flanco sul do Arco de Ponta Grossa. Em seguida, os estudos foram concentrados em escala de semidetalhe em uma porção no centro-sul da área, com aproximadamente 4687,5 km², nas redondezas da cidade de Prudentópolis – PR. Por fim, estudos de alta resolução foram desenvolvidos no Morro do Jacaré, localizado no centro nordeste da área regional, abrangendo 180.000 m² (Figura 1).

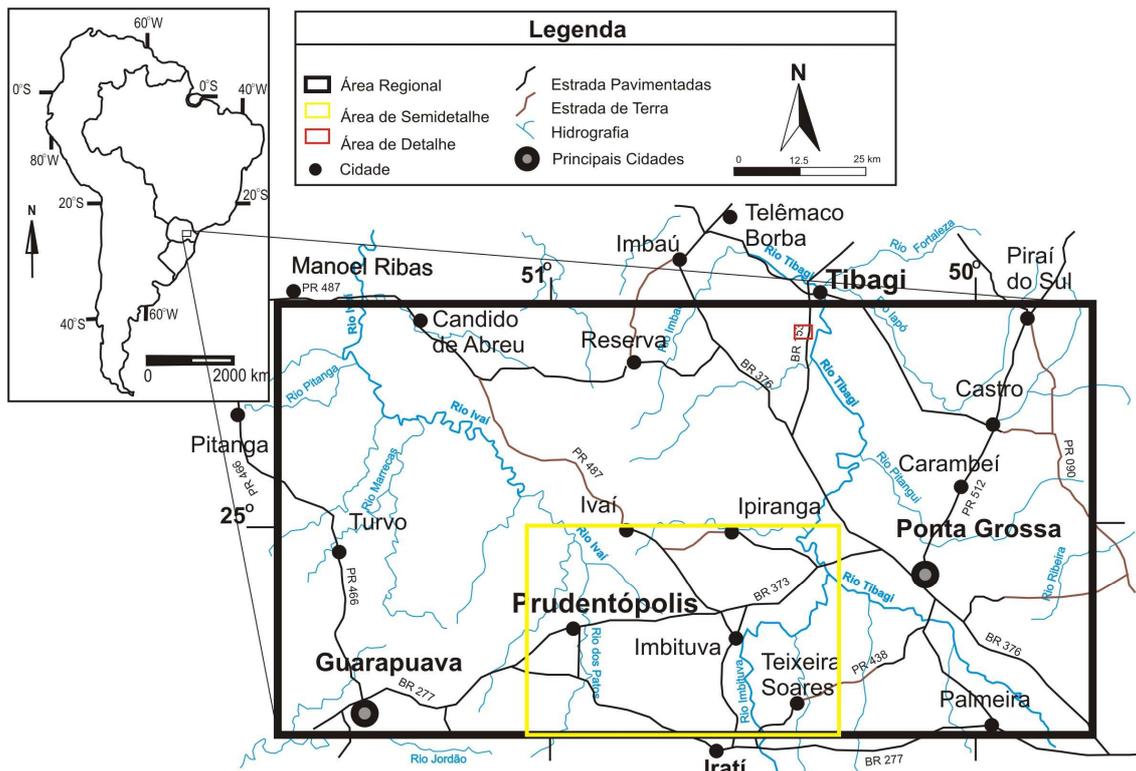


Figura 1 – Localização das áreas de estudo.

Com relação a geomorfologia, seguindo a divisão proposta por Maack (1968) para o estado do Paraná, a área regional distribui-se aproximadamente com 15% no Primeiro Planalto Paranaense, 65% no Segundo Planalto e 20% no Terceiro Planalto (Figura 2). As altitudes variam desde 450m até 1250m para o conjunto das três áreas, sendo as máximas associadas à passagem do primeiro para o segundo planalto e deste para o terceiro planalto, e as mínimas encontradas no vale do rio Ivaí nas proximidades da cidade de Manuel Ribas - PR.

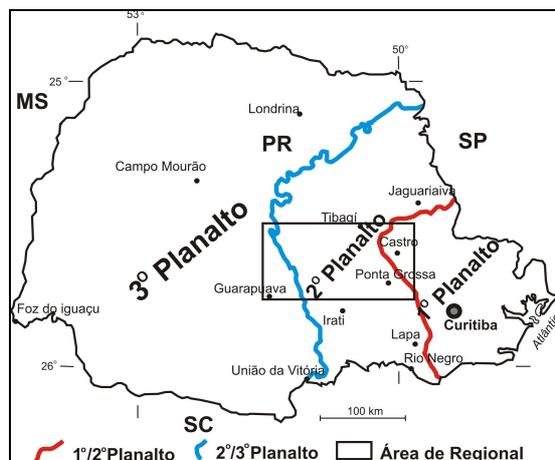


Figura 2 – Mapa do estado do Paraná com divisões geomorfológicas indicando a área regional (mod. de Maack, 1968).

Durante os estudos desenvolvidos nas porções de semidetalhe e de detalhe, constatou-se a presença de feições geográficas, as quais são amplamente utilizadas para o ecoturismo. Nas proximidades de Prudentópolis foram catalogadas mais de 52 quedas d'água de tamanhos e belezas diversas (Prefeitura Municipal de Prudentópolis-PR, 2006), sendo que várias exibem mais de cem metros de desnível (Figura 3). A região do Morro do Jacaré, nas proximidades da cidade de Tibagi, associada à feição ressaltada no relevo, disponibiliza atrativos para grupos que gostam de se aventurar em caminhadas por meios de trilhas as quais levam até o cume deste afloramento rochoso com 60 metros de desnível (Figura 4).



Figura 3 – Aspecto das cachoeiras na região estudada, Salto São Francisco, com 196 metros de altura.

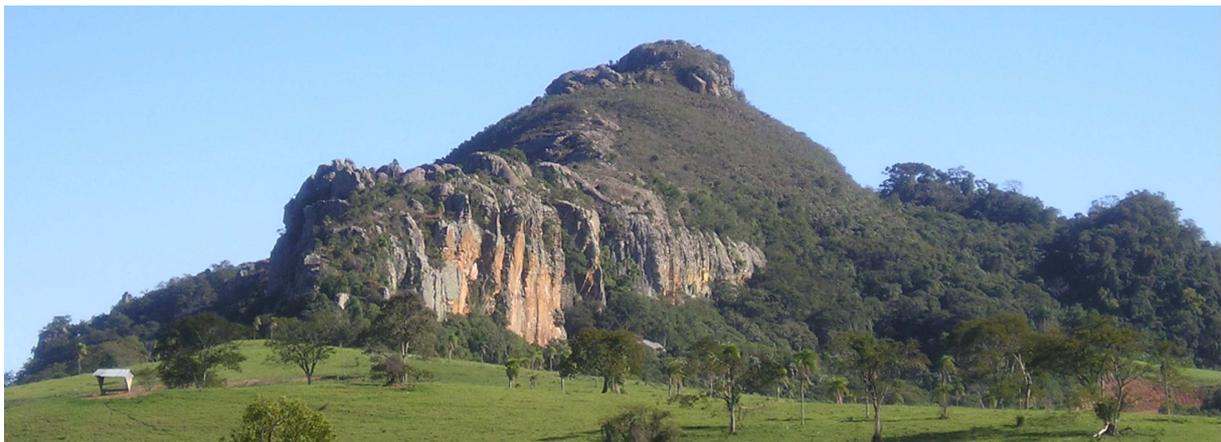


Figura 4 – Feição fisiográfica conhecida como Morro do Jacaré, próximo à cidade de Tibagi – PR (visão para Oeste).

2 OBJETIVOS

Como objetivo principal deste trabalho, destaca-se a sistematização de métodos para a geração de modelos geológicos 3D em diversas escalas, associados ao arcabouço estrutural.

Para o desenvolvimento destas atividades, foram efetuados trabalhos com os seguintes objetivos e métodos intermediários:

1. Revisão bibliográfica: identificar os melhores métodos para abordar a modelagem tridimensional geológica e aplicá-las aos dados disponíveis e adquiridos no presente trabalho;
2. Caracterização estrutural: caracterizar as principais feições morfoestruturais das áreas de estudo, utilizando análise de imagens SRTM 90 (*Shuttle Radar Topography Mission 90 X 90 m*), do satélite Landsat 7 ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), e fotografias aéreas;
3. Identificar, caracterizar e associar as porções aflorantes para estudos de campo dos principais alinhamentos identificados em imagens;
4. Localizar em mapas geofísicos magnetométricos os principais lineamentos; avaliar sua continuidade em profundidade e relacioná-los às feições de superfície;
5. Identificar e correlacionar os níveis estratigráficos através de dados de campo, mapas geológicos e informações de poços profundos;
6. Aplicar uma nova técnica, associando dados obtidos por Laser Scanner (LIDAR - *Light Detection And Ranging*), na modelagem geológica 3D;
7. Representar tridimensionalmente as principais feições estruturais da área;
8. Apresentar modelos tridimensionais em diversas escalas.

3 ASPECTOS GEOLÓGICOS DA BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná (BPR) foi selecionada para acomodar a área de estudo em função da sua potencialidade para de hidrocarbonetos. Segundo Artur (1998),

Milani & Catto (1998) e Artur & Soares (2002), são identificados na BPR dois sistemas petrolíferos (SP): Ponta Grossa-Itararé (PG-I) e Irati-Rio Bonito/Pirambóia (I-RB/P). Milani & Catto (1998) consideram, a partir de análises de gás e óleo, que o SP PG-I apresenta um grande potencial ainda não descoberto, que estende-se por grandes áreas. Por outro lado, Milani *et al.* (1990) avaliam que acumulações de óleo no SP I-RB/P seriam possíveis na calha central da bacia, onde a Formação Irati alcançou condições de maturação, ou em regiões menos profundas, onde aquecimentos anômalos decorrentes do magmatismo Serra Geral poderiam ter promovido o craqueamento da matéria orgânica e a geração de petróleo.

Através de estudos realizados na Bacia do Paraná (França & Potter, 1988), o Grupo Itararé foi reconhecido como o melhor reservatório para hidrocarbonetos pelas seguintes razões: (i) estar em contato direto com os folhelhos da Formação Ponta Grossa; (ii) conter corpos maciços de arenito com boas características de reservatório; (iii) possuir rochas potencialmente capeadoras, representadas por lamitos seixosos, siltitos e corpos de diabásio; e, principalmente, (iv) ter os melhores indícios de hidrocarbonetos.

O sistema petrolífero Ponta Grossa-Itararé apresentou recentes descobertas de acumulações e aumento do potencial gaseífero no campo de Barra Bonita, em Pitanga-PR e Mato Rico-PR. Soma-se ainda que a Bacia do Paraná já apresenta um nível considerável de conhecimento sobre modelos de acumulação de hidrocarbonetos, faltando, no entanto, estudos específicos que envolvam a análise estrutural aplicável à migração de fluidos e direcionada à indústria do petróleo.

Diversos métodos de interpretação de estruturas na Bacia do Paraná, diretos e indiretos, vêm sendo utilizados nas últimas décadas. Entre os mais conhecidos e empregados, destacam-se os mapeamentos de superfície, métodos geofísicos magnetométricos e gravimétricos, além de análises morfoestruturais em imagens de satélite e radar (*e.g.* Ferreira, 1982a,b; Zalán *et al.*, 1987; Soares *et al.*, 1982; Artur, 1998; Freitas, 2005).

Um dos problemas quanto ao conhecimento estratigráfico-estrutural da bacia deve-se ao fato desta estar capeada por rochas basálticas com espessura de até 2.000 m, o que dificulta o mapeamento geofísico sísmico. Como a realização de um grande número de sondagens é economicamente inviável, os estudos ficam restritos aos afloramentos nas áreas marginais (Figueira, 2004).

3.1 CONTEXTO MORFOESTRUTURAL DA BACIA DO PARANÁ

A Bacia do Paraná, uma das diversas bacias sedimentares terrestres que ocorrem no território brasileiro, é uma bacia intracratônica alongada na direção NS e localiza-se na porção centro-leste do continente sul-americano, com uma área aproximada de 1.600.000 km², que abrange os territórios do Brasil, Argentina, Paraguai e Uruguai. Na Argentina e no Uruguai esta é denominada Chaco-Paraná. Segundo Milani & Thomaz Filho (2000) e Milani (2004), as seqüências cratônicas do Fanerozóico na América do Sul formaram-se desde o início do Ordoviciano até o Cretáceo, ocupando mais de 3,5 milhões de km², distribuídos em 5 grandes bacias sedimentares: Solimões, Amazonas, Parnaíba e Paraná no Brasil, e Chaco-Paraná na Argentina, Paraguai e Uruguai (Figura 5).

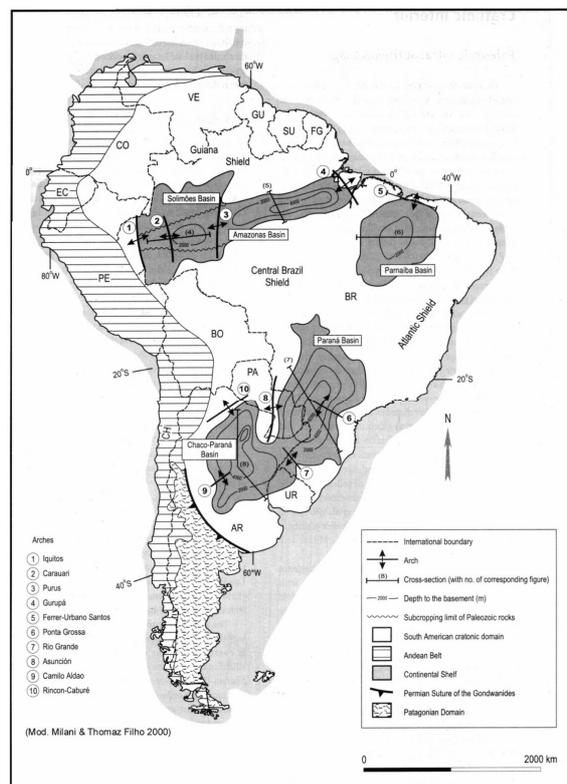


Figura 5 - Mapa de localização das principais bacias intracratônicas da Plataforma Sul-americana (Milani & Thomaz Filho, 2000).

De acordo com Zalán *et. al.* (1990), os principais elementos tectônicos que constituem o arcabouço estrutural da Bacia do Paraná podem ser divididos segundo as orientações NW-SE, NE-SW e E-W. As orientações NW-SE e NE-SW foram interpretadas como zonas de fraqueza antigas, as quais foram recorrentemente

ativas e exerceram controle estrutural. Durante a evolução tectônica da Bacia na sedimentação de várias unidades estratigráficas, as falhas com orientação NW-SE foram reativadas durante o rifteamento Juro-Cretáceo do Gondwana e condicionaram corpos ígneos intrusivos e a extrusão de grandes derrames basálticos, pressionando verticalmente a crosta devido ao seu peso, causando uma nova fase de subsidência da bacia. As zonas de falhas com direção NE-SW relacionam-se a movimentações transcorrentes. Os lineamentos E-W, estudados por exemplo recentemente por Strugale (2002), ocorrem a partir do Triássico e podem ser detectados, em mapas aeromagnéticos e imagens Landsat (Figura 6).

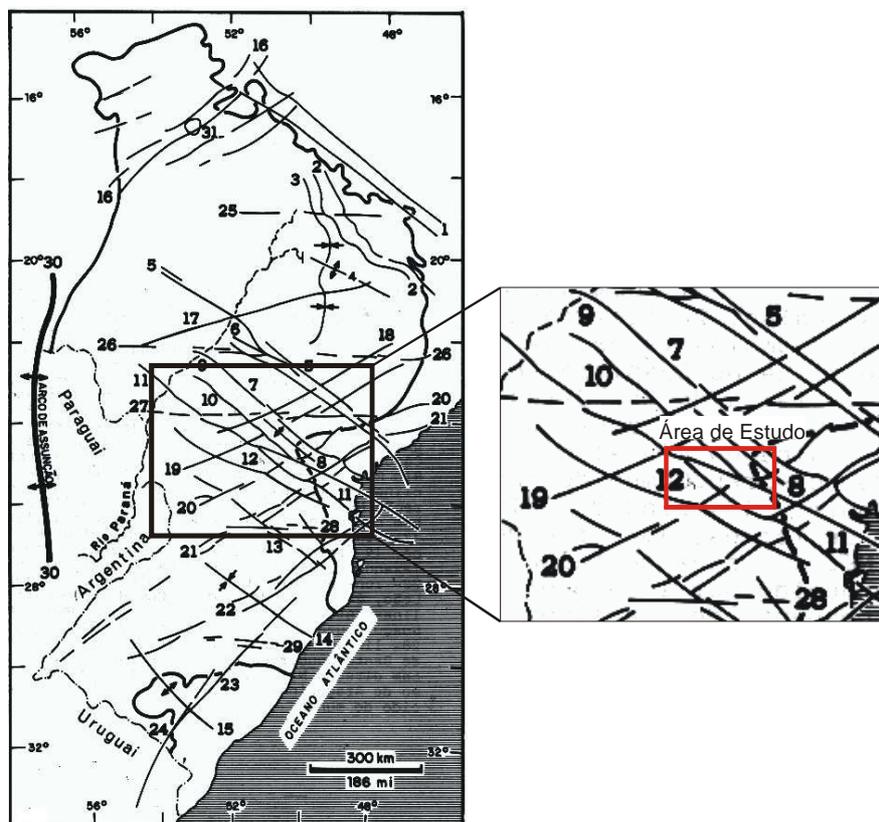


Figura 6 - Mapa do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná (mod. de Zalán *et al.* 1987) Os elementos tectônicos mais importantes com direção NW são: 1. Arco do Alto Paranaíba, 2. Flexura de Goiânia, 3. Baixo de Ipaçu / Campina Verde, 4. Alto do Cardoso, 5. Zona de Falha de Guapiara, 6. Falha de Santo Anastácio, 7. Falha de São Jerônimo/ Curiúva, **8. Arco de Ponta Grossa**, 9. Zona de Falha Curitiba/ Maringá, **10. Falha do Rio Alonzo**, **11. Zona de Falha Cândido de Abreu / Campo Mourão**, **12. Lineamento do Rio Piquiri**, 13. Zona de Falha Caçador, 14. Sinclinal de Torres, 15. Arco do Rio Grande. Com direção NE: 16. Zona de Falha Transbrasiliiano, 17. Lineamento de Araçatuba, 18. Falha de Guaxupé, **19. Falha de Jacutinga**, **20. Zona de Falha de Taxaquara**, 21. Zona de Falha Lancinha/ Cubatão, 22. Zona de Falha Blumenau / Soledade, 23. Falha do Leão, 24. Falha de Açotea. Com direção E-W: 25. Lineamento de Cassilândia, 26. Lineamento Mogi Guaçu / Dourados, 27. Lineamento São Sebastião, 28. Lineamento Taquara Verde, 29. Lineamento de Bento Gonçalves e com direção N-S: 30. Arco de Assunção. O Domo de Araguinha (31) é o maior astroblema conhecido do mundo.

A Bacia do Paraná apresenta uma espessura máxima aproximada de 6.000m de rochas sedimentares/ígneas de origem terrígena com níveis finos de calcários isolados e evaporitos que ocorrem na Formação Irati. Estas rochas foram capeadas pelos derrames de lavas basálticas denominadas de Formação Serra Geral. Segundo Zalán *et al.* (1990) as rochas da Bacia do Paraná foram depositadas sobre uma vasta área de escudo do continente Gondwana e a maior parte da evolução estratigráfica-estrutural foi controlada por *trends* herdados desse embasamento. Esta evolução mostra intercalações de eventos orogênicos nas bordas da placa sul-americana e eventos epirogênicos caracterizados por subsidência da bacia e magmatismo (Assine, 1996; Zalán, 1991 *apud* Milani, 2004 e Rostirolla *et al.*, 2000).

Os eventos deposicionais estão divididos em seis grandes seqüências limitadas por expressivas discordâncias regionais (Milani *et al.*, 1993 *apud* Milani *et al.*, 1994 e Milani, 2004): ordovício-siluriana, devoniana, carbonífera-eotriássica, neotriássica, jurássica-eocretácea e neocretácea (Figura 7 eFigura 8).

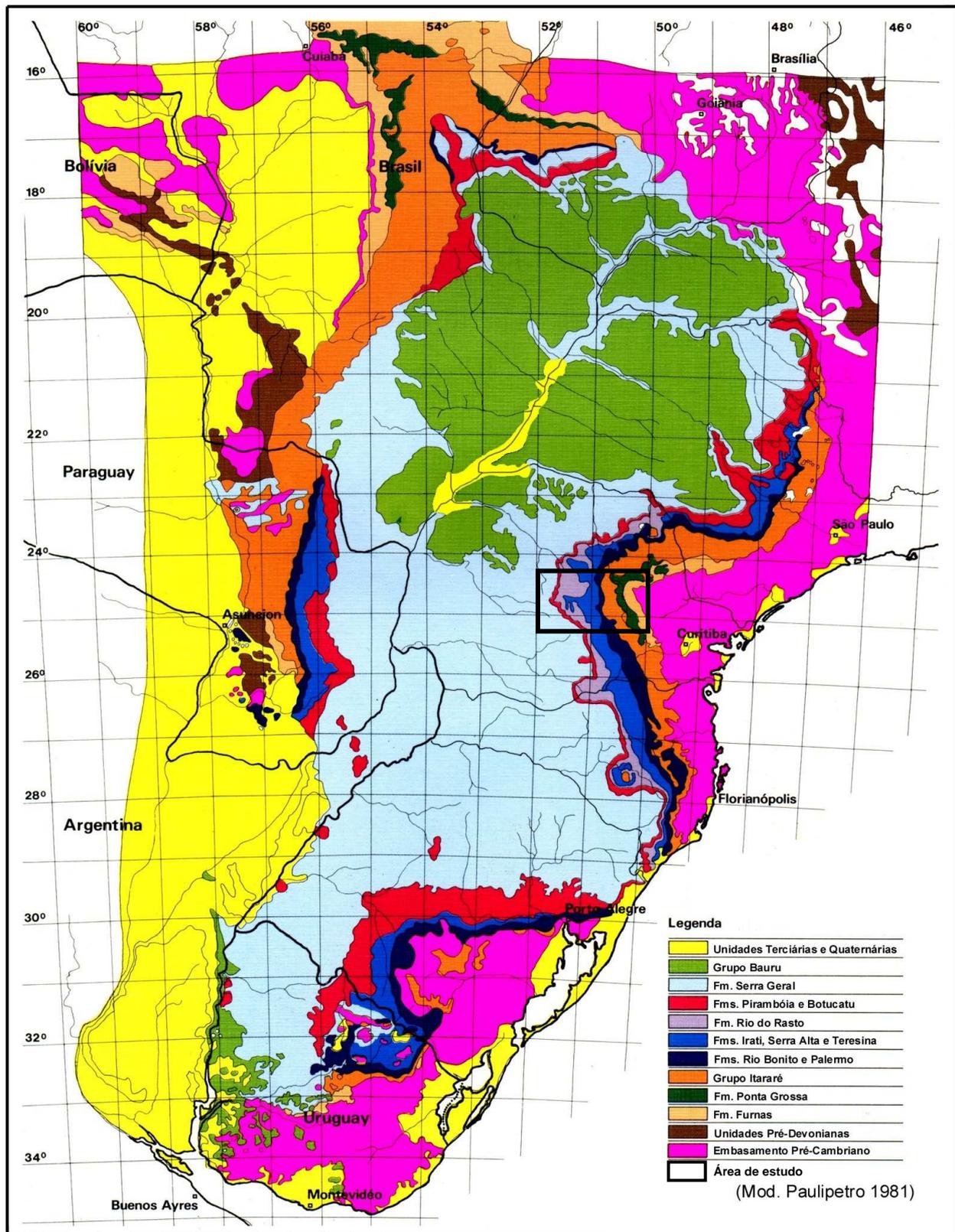


Figura 7 - Mapa geológico simplificado da Bacia do Paraná (mod. Paulipetro, 1981).

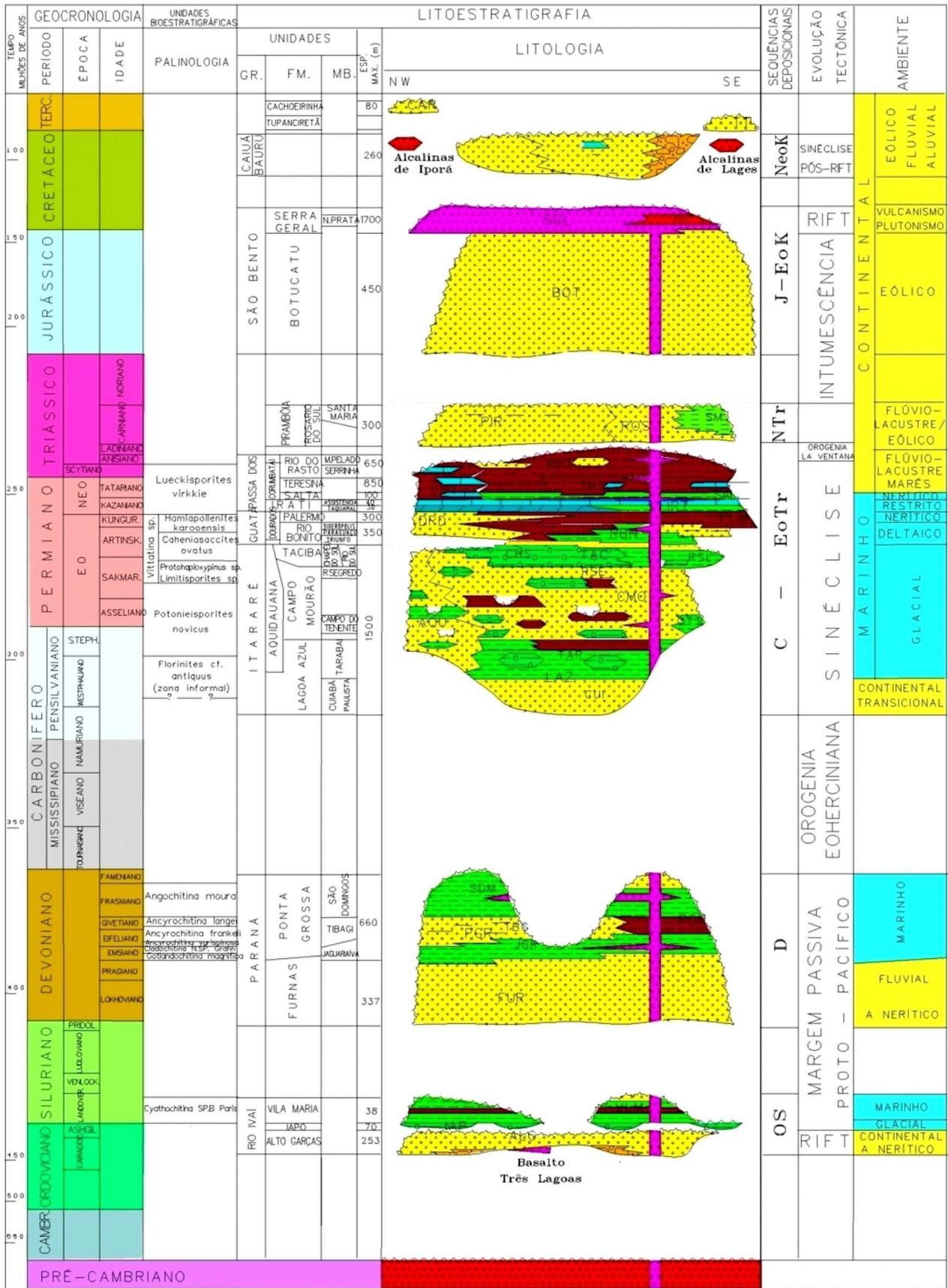


Figura 8 – Coluna crono-litoestratigráfica da Bacia do Paraná (mod. Milani et al., 1994).

3.2 GEOLOGIA DA ÁREA DE ESTUDO

Com 19.500 km², ocupando uma região do Terceiro e do Segundo Planalto e localizada na porção centro-leste do estado do Paraná, a área regional de estudo abrange uma faixa aflorante da Bacia do Paraná, compreendendo boa parte da seção sedimentar exposta. Seus registros envolvem rochas de cinco das seis grandes seqüências de Milani *et al.*, (1994) citadas anteriormente exceto a seqüência neocretácia.

Estruturalmente, a área é segmentada por cinco grandes lineamentos definidos por Zalán *et al.* (1990): Zona de Falha Cândido de Abreu / Campo Mourão, Lineamento do Rio Piquiri e Falha do Rio Alonzo, de direção NW–SE, a Zona de Falha de Taxaquara, e Falha de Jacutinga na direção NE–SW. A norte da área, encontra-se o Arco de Ponta Grossa. Este condicionou a geração de inúmeras intrusões ígneas (diques) de direção NW-SE, as quais, por sua vez, ocorre de maneira menos expressiva na área de estudo, em comparação ao seu eixo.

Na área de estudo, as seqüências estratigráficas são afetadas por diversas estruturas tectônicas, apresentando-se na forma de afloramentos de rochas, que englobam os dois sistemas petrolíferos da bacia. Sendo assim, estudos foram desenvolvidos para toda a seção sedimentar presente.

3.2.1 Grupo Rio Ivaí

Definido principalmente por dados obtidos em perfis de poços profundos da BPR, o Grupo Rio Ivaí, com idade neo-ordoviciano e eossiluriano, compreende a unidade basal da bacia (Assine *et al.*, 1994). É dividido em três formações: Alto Garças, Iapó e Vila Maria. Milani *et al.* (1994) descrevem, em ordem crono-estratigráfica respectivamente, a primeira unidade com sendo composta por arenitos e quartzitos, a segunda formada por diamictitos e a superior caracterizada por siltitos fossilíferos. Zalán *et al.* (1987) citam que a deposição ocorreu sobre uma calha central de direção N-S.

O Grupo Rio Ivaí ocorre em uma ampla porção da bacia, entretanto, suas espessuras são pouco expressivas, com seções incompletas e geometrias descontínuas (Milani *et al.*, 1994).

3.2.2 Grupo Paraná

Depositado sobre o Grupo Rio Ivaí, o Grupo Paraná compreende duas formações: Furnas (base) e Ponta Grossa (topo). A primeira apresenta contato basal discordante e é composta de arenitos brancos a amarelados, caolinícos, médios a grossos, por vezes conglomeráticos e com estruturas características de um ambiente continental fluvial (Milani *et al.*, 1994; Milani, 2004). A Formação Ponta Grossa, depositada em contexto transgressivo, envolve folhelhos, siltitos e arenitos, com estruturas características de ambiente plataformal raso, com eventuais influências deltaicas.

Conforme Milani (2004), a Seqüência Devoniana ocorre em toda a bacia, estendendo-se até porções do Chaco Argentino-Paraguaio-Boliviano, alcançando até 850 metros de espessura.

3.2.3 Grupo Itararé

O Grupo Itararé é a unidade lito-estratigráfica mais espessa e bem estudada da Bacia do Paraná. O grupo inicia-se com depósitos glaciogênicos continentais na base que passam à marinhos no topo, com cerca de 1200 metros de espessura. Estende-se por toda a bacia, aflorando tanto na porção oriental quanto na ocidental. França & Potter (1988), através de correlações de dados de poços (mapeamento de subsuperfície), subdividiram o grupo em quatro formações: Lagoa Azul, Campo Mourão, Taciba e Aquidauana.

Segundo França & Potter (1988), a Formação Lagoa Azul, seção basal do Grupo Itararé não aflorante, ocorre na porção central da bacia, principalmente nos estados de São Paulo e Paraná e sudeste de Mato Grosso do Sul. É composto por arenitos na base seguidos por folhelhos e diamictitos no topo.

A Formação Campo Mourão é predominantemente arenosa na base, passando para folhelhos, siltitos, lamitos seixosos e diamictitos no topo. Esta formação ocorre praticamente em toda a bacia, também são observadas interdigitações com a Formação Aquidauana ao norte (França & Potter, 1988). Em alguns poços perfurados no estado do Paraná (2-RO-1-PR, 1-BB-1-PR e 2-SC-1-

PR) encontrou-se indícios de hidrocarbonetos relacionados a reservatórios arenosos do Grupo Itararé (Milani *et al.*, 1990).

Compondo a porção superior do Grupo Itararé, a Formação Taciba é caracterizada por lamitos seixosos, arenitos, folhelhos e siltitos. Esta foi depositada concordantemente à Formação Campo Mourão, exceto nas proximidades do Arco Sul Rio-Grandense, onde assenta-se discordantemente sobre o embasamento cristalino (França & Potter, 1988).

Milani *et al.* (1994), descrevem a Formação Aquidauana como unidade aflorante a norte-noroeste da bacia, composta por arenitos avermelhados semelhantes às rochas da margem leste da bacia, porém afetadas por influxo de águas meteóricas e oxidação, o que caracteriza sua coloração.

3.2.4 Grupo Guatá

Associado ao degelo e a uma subida do nível do mar, o Grupo Guatá depositou-se na bacia. Compreende as formações Rio Bonito (base) e Palermo (topo) e apresentam, na sua porção basal, arenitos, intercalados por lentes e leitos de carvão, siltitos e folhelhos, característicos de uma sedimentação deltáica típica de ambientes costeiros/marinhos dominados por ondas e marés (Milani *et al.*, 1994, Rostirolla *et al.*, 2000). Sua porção intermediária é representada por siltitos e siltitos arenosos intensamente bioturbados.

3.2.5 Grupo Passa Dois

Composto por quatro formações (Irati, Serra Alta, Teresina e Rio do Rasto), o Grupo Passa Dois exhibe rochas com idades neo-permianas à eotriássicas. A Formação Irati é composta por folhelhos, folhelhos betuminosos, arenitos, margas, carbonatos e anidritas, caracterizando um mar restrito, progressivamente mais salino da base para o topo, com até 70 metros de espessura (Milani *et al.*, 1994). Os folhelhos betuminosos, com teores de até 23% de matéria orgânica, constituem as rochas mais favoráveis para a geração de hidrocarbonetos (Milani *et al.*, 1990). Acima, encontra-se a Formação Serra Alta, representada por folhelhos e espessuras

de até 100 metros, tendendo a uma constante continentalização e a deposição de argilitos, siltitos cinza-claros, coquinas e calcários oolíticos da Formação Teresina, somando até 800 metros. Por fim, no topo do grupo, a Formação Rio do Rasto é constituída por arenitos, siltitos e folhelhos arroxeados, avermelhados e esverdeados, atingindo até 650 metros de espessura (Milani *et al.*, 1994).

3.2.6 Grupo São Bento e Formação Pirambóia

Apresentando uma das maiores espessuras da Bacia do Paraná, com até 2150 metros, o Grupo São Bento é dividido em duas formações: Botucatu e Serra Geral. Conforme Milani *et al.* (1994), a Formação Pirambóia com aproximadamente 300 metros de espessura, é constituída por arenitos avermelhados a esbranquiçados, localmente conglomeráticos, depositados em sistemas continentais flúvio-lacustres/eólicos. Soares (1973), propôs a individualização da Formação Botucatu, que é representada por arenitos avermelhados bem selecionados, com estratificações cruzadas de grande porte, depositados em sistemas eólicos, associados à formação de um extenso campo de dunas. A Formação Serra Geral é composta por rochas ígneas vulcânicas, representadas por basaltos toleíticos e andesitos basálticos, ocorrendo quantidades subordinadas de riolitos e riolacitos. Diabásios intrusivos em toda a seção sedimentar da Bacia, na forma de soleiras e diques, são também correlacionados à Formação Serra Geral.

4 MÉTODOS EMPREGADOS NA ANÁLISE MULTI-ESCALA

Para a execução deste trabalho foram efetuados levantamentos de dados em campo e atividades em laboratório. Tais tarefas foram desenvolvidas em várias etapas, sempre visando correlacionar os materiais colhidos em campo com aqueles obtidos em laboratório, referentes à interpretação de imagens de sensores remotos, desenvolvendo um estudo em multi-escala.

O início das atividades compreendeu a coleta de informações em laboratório e sua correlação com dados de afloramentos. Estes foram organizados em um banco de dados geral da área. Após obter de forma sucinta as informações relevantes da área regional iniciou-se a etapa de detalhamento na porção de

semidetalhe. De posse dos dados das áreas regional e de semidetalhe, foram realizados estudos sobre os modelos tridimensionais geológicos.

Por fim, escolheu-se o Morro do Jacaré como área alvo para detalhe. Neste afloramento utilizou-se o método de imageamento tridimensional de afloramentos, como ferramenta importante na geração dos modelos 3D de alta resolução (Figura 9).

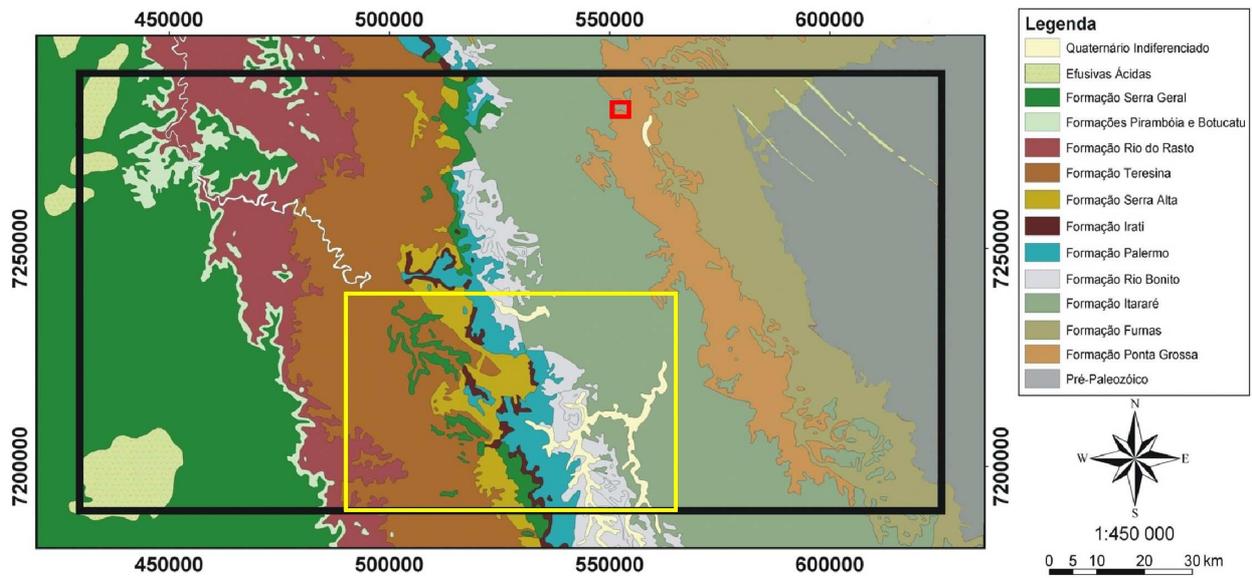


Figura 9 – Mapa geológico indicando as áreas de estudo: regional (retângulo preto), de semidetalhe (retângulo amarelo) e de detalhe (retângulo vermelho) (mod. DNPM, 1989).

4.1 INTERPRETAÇÃO POR SENSORES REMOTOS

No desenvolvimento deste trabalho foram utilizados seis formatos de produtos de sensores remotos, cada qual objetivando a interpretação e reconhecimento de estruturas em escalas de visualização distintas. São eles: imagens SRTM, imagens Landsat, mapas de contorno estrutural, mapas geofísicos, fotografias aéreas (1:10.000) e dados de Laser Scanner.

4.1.1 Interpretação em imagens SRTM

Os estudos efetuados sobre imagens SRTM tiveram como objetivo principal o reconhecimento das principais feições lineares presentes na área.

Os dados brutos, com uma resolução de 90 x 90 metros, foram coletados no site da NASA (USGS *et al.*, 2004), no formato nativo ARC-Info (formato binário *.adf), sob o datum WGS84. Tais dados foram inseridos no programa ArcMap™ (ArcView 8.3), com o objetivo de gerar modelos digitais de elevação (MDE) os quais foram iluminados em quatro direções principais (0°, 45°, 90° e 315°). A inclinação da luminosidade em relação ao plano horizontal foi de 45°, com exagero vertical de duas vezes, para todas as direções.

Para a confecção destes modelos, seguiu-se a seguinte rotina: criou-se um projeto em ArcMap™, onde pelo comando *Add data* (↓) foram inseridos os dados brutos de radar. Em seguida com o comando *Enhanced Create Shapefile* (⊕), foi gerado um arquivo no formato *Shapefile* (.shp), para delimitar a área de interesse (Figura 10).

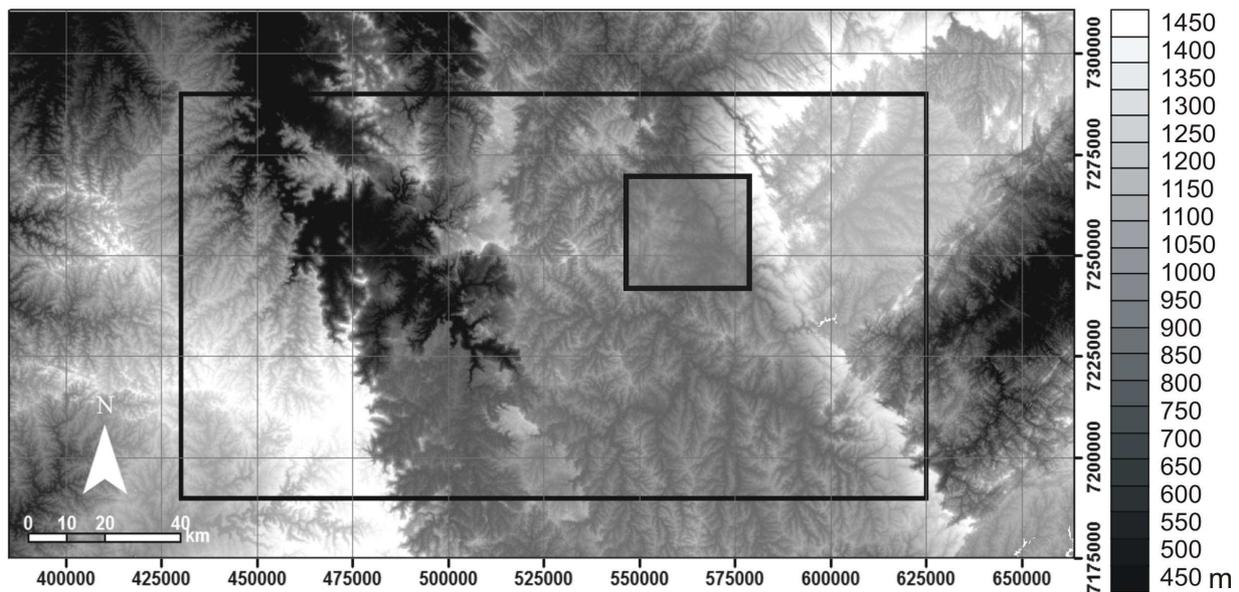


Figura 10 – Imagem SRTM pré-processada, indicando a área regional (retângulo maior) e a área utilizada como exemplo na Figura 11 representada pelo quadrado menor.

Para a geração dos modelos, foi utilizada a licença *3D analyst* do ArcView, e através da rotina: *3D Analyst – Surface Analysis – Hillshade*, foram atribuídos os dados de entrada, a direção, a inclinação da iluminação, o exagero vertical e o nome do arquivo de saída.

O resultado final foi à geração de quatro modelos digitais de elevação, nas direções mencionadas(Figura 11), disponibilizando, assim, imagens que ressaltam os principais lineamentos de toda área.

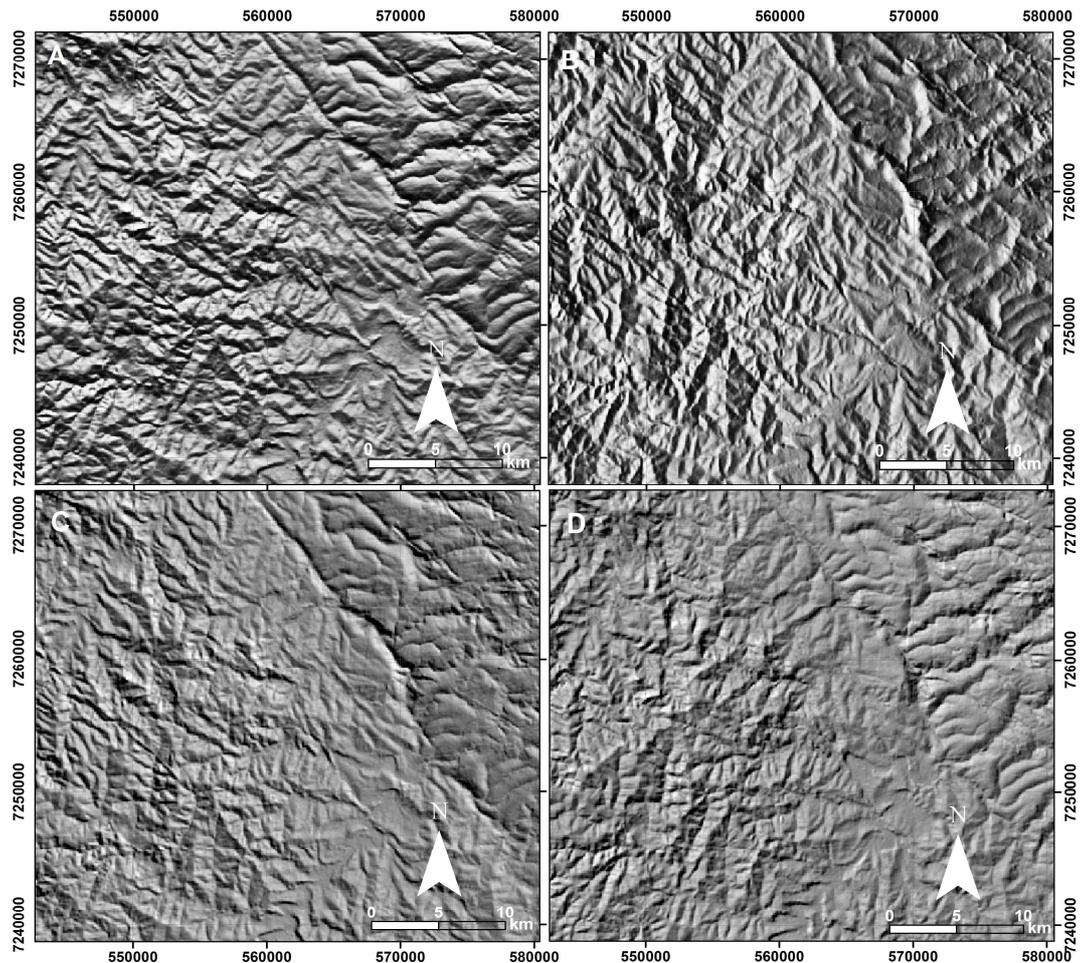


Figura 11 – Modelos digitais de elevação de uma porção no nordeste da área. (A) iluminação com azimute 0° , (B) iluminação com azimute 90° , (C) iluminação com azimute 45° e (D) iluminação com azimute 315° , todos com inclinação 45° .

Após confeccionados os MDEs, iniciou-se a etapa de visualização e interpretação dos principais lineamentos. Como decorrência da resolução de 90 X 90 metros, a escala média de interpretação utilizada foi de 1:300.000. Entretanto, tal resolução permite interpretações próximas da escala 1:100.000.

Para a demarcação das principais feições lineares, foram traçados todos os segmentos visíveis nos modelos, em todas as direções, separando os lineamentos negativos dos positivos, referentes a vales e cristas, respectivamente. Como passo seguinte, os lineamentos foram filtrados, seguindo critérios da maior continuidade que eles apresentavam. Aqueles que apresentaram maiores continuidades, isto é, os lineamentos compostos por um conjunto de fragmentos alinhados, com mais de vinte quilômetros em extensão, foram preservados e outros com pouca ou nenhuma continuidade foram descartados (Figura 12), caracterizando as principais feições lineares. Por fim, somente os principais lineamentos foram preservados, os quais foram melhor detalhados e visualizados em imagens Landsat 7 ETM+. Devido

concentrar estudos na porção da BPR, que serviu para a modelagem 3D, a interpretação dos lineamentos foi limitada à área da bacia, com exceção de alguns lineamentos presentes na região do embasamento.

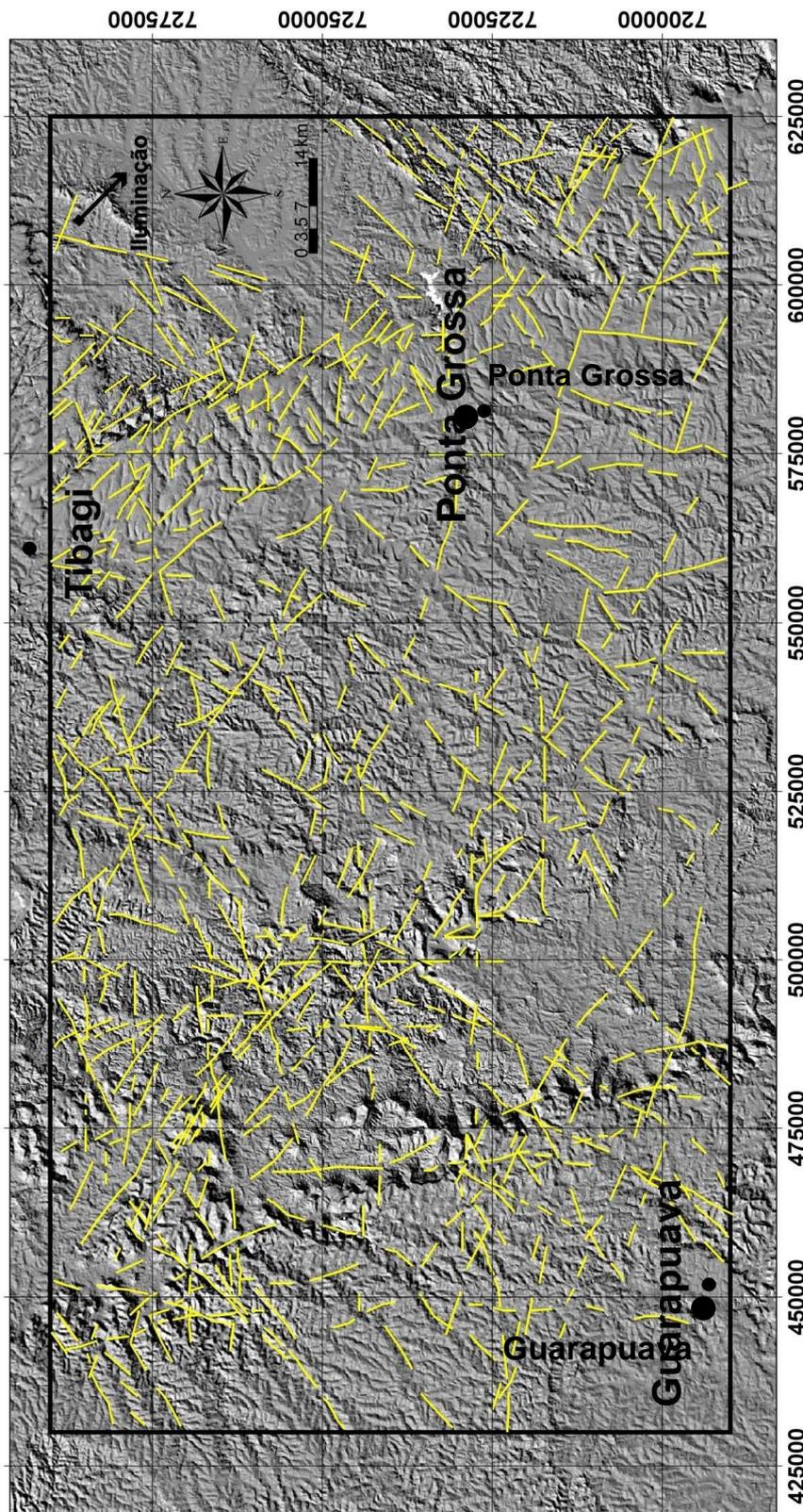


Figura 12 – Imagem SRTM indicando área de estudo regional e principais lineamentos interpretados a partir das quatro direções de iluminação.

4.1.2 Interpretação em imagens Landsat 7 ETM+

Com o objetivo de refinar os lineamentos previamente interpretados em SRTM, foram inseridas imagens Landsat no projeto em ArcMap, com o auxílio do comando *Add Data*. Estas imagens apresentam uma resolução espacial de 30 x 30 metros, permitindo uma interpretação na escala média de 1:75.000 a até trabalhos em 1:25.000.

Com as imagens carregadas no projeto de trabalho, foram escolhidas combinações de bandas para visualização. Cada imagem de satélite, possui 9 bandas, sendo duas destas termais. As bandas do espectro visível e do infravermelho (bandas 1 a 5 e banda 7) apresentam resolução espacial de 30 metros. As bandas do infravermelho termal (6h e 6l – alto e baixo ganho) têm resolução de 60 metros, enquanto a banda pancromática (banda 8) apresenta 15 metros de resolução espacial (Williams, 2004). As imagens de satélite podem ser combinadas para ressaltar diferentes informações da superfície. Com isso em mente, e conforme descrito por Akhir & Abdullah (1997) e Madani, (2001), as bandas 4, 5 e em tons de cinza, e combinações entre elas, são as mais adequadas para a interpretação de feições geológicas estruturais. Entretanto, utilizando-se critérios visuais e seguindo a bibliografia, foram classificadas como sendo as melhores para a investigação as bandas de composições RGB 854 e 543, conforme mostra a Figura 13.

Ao total, foram utilizadas quatro imagens de satélite para cobrir toda a área de estudo, sendo estas as cenas: 221-77, 222-77, 221-78 e 222-78.

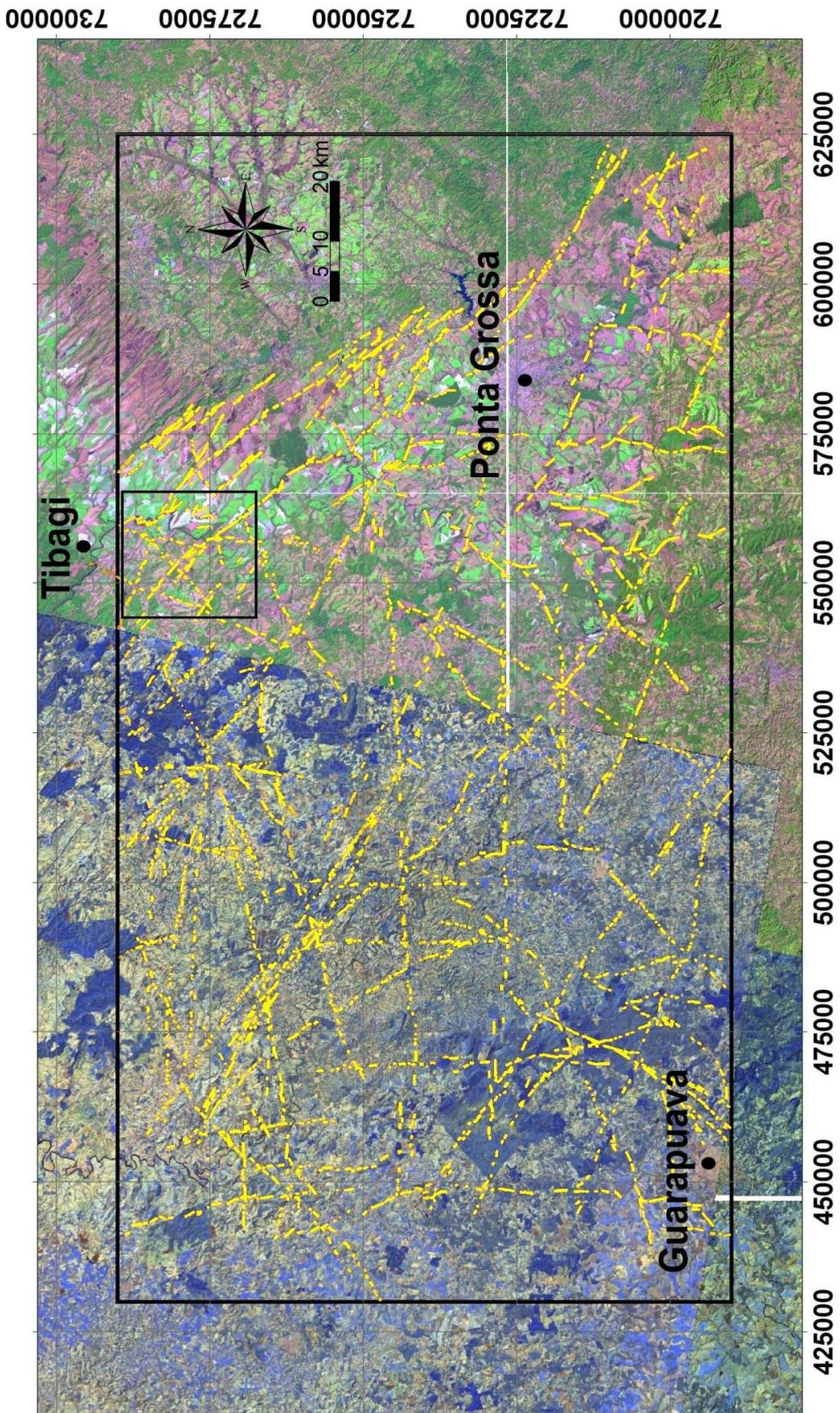


Figura 13 – Lineamentos sobrepostos a imagens Landsat 7 ETM+ indicando a área da Figura 14. À direita, combinação de bandas 543 e a esquerda 854.

Com as imagens carregadas e configuradas, iniciou-se o refinamento dos lineamentos traçados em SRTM. Para isso, foram criados dois arquivos, com formato *shapefile*, referentes ao refinamento dos lineamentos positivos e negativos.

Com os principais lineamentos interpretados em SRTM, estes foram sobrepostos às imagens de satélite, visando identificar nestas as mesmas feições lineares e suas continuidades.

Devido à maior resolução das imagens Landsat 7 ETM+ e à visualização média utilizada de 1:75.000, em muitos casos as megafeições foram segmentadas, resultando em uma gama de fragmentos retilíneos muitas vezes com traços paralelos e contínuos entre si. Fato este geralmente associado a natureza de zonas de falha, apresentando repetição de uma feição estrutural em diversos tamanhos, apresentando uma relação fractal para a área (Figura 14).

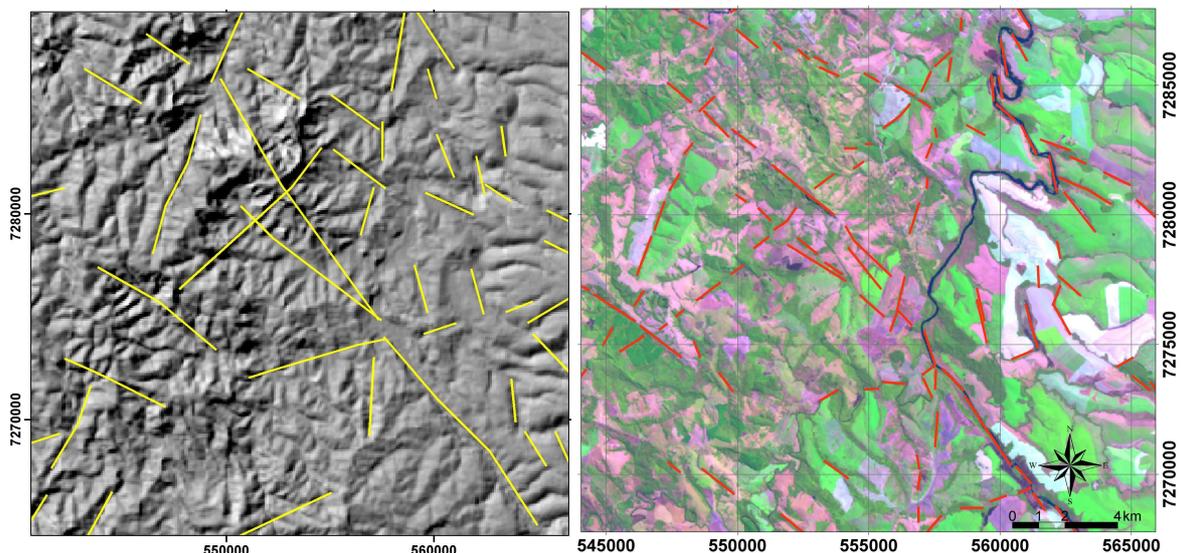


Figura 14 – Lineamentos detalhados em imagens Landsat (direita), a partir do traçado em SRTM (esquerda), na porção nordeste da área.

Depois de traçadas e detalhadas as megaestruturas nas imagens Landsat, iniciou-se a fase de filtragem, análise e interpretação dos fragmentos gerados. Procurou-se unir os diversos lineamentos, negativos e posteriormente positivos, mais contínuos e alinhados que apresentassem maior expressividade na área.

Por fim criou-se um mapa com as principais feições estruturais contínuas, visíveis em dados SRTM e Landsat, presentes na área de estudo (Figura 15), que

foram exportadas, em formatos de texto, e utilizadas como auxílio na geração dos modelos tridimensionais.

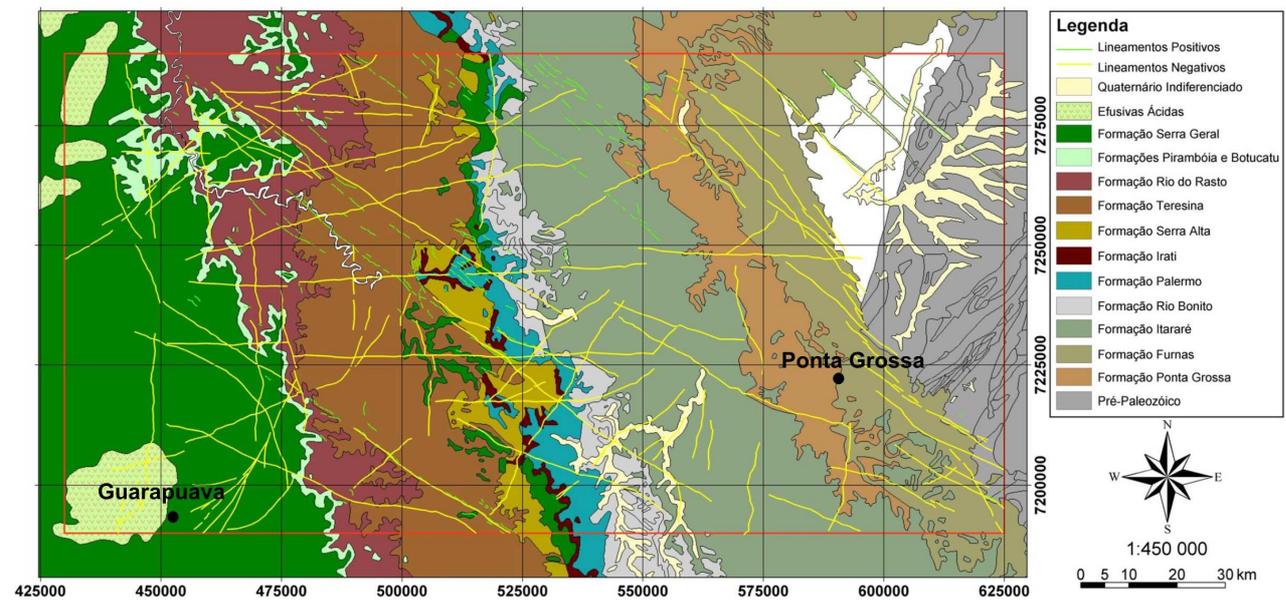


Figura 15 – Principais lineamentos interpretados (SRTM/Landsat), sobrepostos ao mapa geológico (mod. DNPM, 1989).

4.1.3 Interpretação em mapas de contorno estrutural

Foram gerados mapas de contorno estrutural dos topos das formações geológicas, para *obtenção* de informações sobre o comportamento dos lineamentos com relação às unidades da área de estudo, Estes foram associados e reconstituídos em um horizonte médio, gerando assim um mapa de contorno integrado de todas as unidades, chamado de mapa do horizonte fantasma, onde foram sobrepostos os lineamentos previamente descritos e interpretados.

O procedimento de geração dos mapas de contorno estrutural utilizou oito programas, são estes: ArcMap 8.3 (*Copyright* © 1999-2002, ESRI, Inc.), Didger3 (*Copyright* © 2001, Golden Software, Inc.), Dxf2xyz 1.3 (*Copyright* © 1999-2000 Guthrie CAD/GIS Software), PETREL 2004 (*Copyright* © 1998-2004, Schlumberger), Surfer 8 (*Copyright* © 1993-2002, Golden Software, Inc.), Global Mapper v6.01 (*Copyright* © 2004, Global Mapper Software LLC), Excel 2002 (*Copyright* © Microsoft Corporation 1985-2001) e Notepad (*Copyright* © Microsoft Corporation 1981-2001).

A partir do mapa geológico digitalizado do estado do Paraná (DNPM, 1989), contido no banco de dados, obteve-se em formato *shapefile* (.shp - ArcMap) os

contatos das unidades geológicas. Para a conversão e fragmentação do arquivo .shp, estes dados foram importados em formato de linhas para ambiente Digger3, onde cada contato entre as unidades geológicas, no total de dez, foi exportado em arquivo no formato .dxf.

Com o *software* Dxf2xyz, os dados gerados de cada unidade foram convertidos em arquivos texto (ASCII), assim disponibilizando informações 2D pontuais de X e Y, referentes à coordenadas UTM. O passo seguinte foi inserir estes dados em ambiente PETREL. Neste, os arquivos de texto foram importados com o formato de linhas 2D.

Para atribuir informações às linhas quanto as suas altitudes, utilizou-se o programa Global Mapper. Neste converteu-se os dados das imagens SRTM em pontos no formato .txt, que foram inseridos no *software* PETREL. A partir desta nuvem de pontos, utilizando o comando *Make/Edit Surface* foi gerada uma superfície do relevo da área de estudo.

Com as linhas carregadas e a superfície do relevo gerada em PETREL, informações de Z (altitude) foram atribuídas aos contatos geológicos da seguinte forma: clica-se sobre o *layer* referente a cada unidade e utilizando o comando *Settings* → *Operations* → *Replace Where* → $Z = surface(x,y)$, as linhas são rebatidas exatamente sobre a superfície. Em seguida, pela seqüência *Settings* → *Operations* → *Polygons Operations* → *Equal space*, as linhas foram reamostradas com espaçamentos regulares de 100 metros, e, posteriormente, com o comando *Settings* → *Operations* → *Convert Points/Polygons/Surfaces* → *Convert to Points*, estas foram convertidas para pontos, oferecendo assim uma amostragem regular. Por fim, os arquivos originais ASCII dos topos de cada unidade aflorante incorporaram dados de altitudes, transformando-os em arquivos X, Y e Z.

Utilizando os arquivos de texto criados com o *software* Surfer 8, foi gerado inicialmente um *grid* para cada topo de unidade, com a rotina: *grid* → *data* (abre o arquivo ASCII gerado) → método de krigagem pontual, este contendo quatro setores de busca, com um raio de varredura de 5000 metros e com geometria quadrática de espaçamento 1000 x 1000 metros, → salva nome do arquivo .grd. Em seguida clica-se em *map* → *contour map* → *new contour map* e abre-se o arquivo *.grd. Assim, foram gerados dez mapas de contornos estruturais, um para cada unidade (Figura 16). Entretanto, ao se sobrepor e ordenar estes mapas em suas posições espaciais

em UTM, não se obteve um mapa geral com boa qualidade para interpretação, devido muitos mapas de contorno ocuparem coordenadas X e Y muito próximas, sobrepondo uns aos outros (Figura 17). Desta forma optou-se por utilizar um método onde todos os dez mapas gerados foram rebatidos para um horizonte médio, assim originando um mapa de contorno estrutural integrado da área inteira, chamado de horizonte fantasma. A Formação Palermo foi escolhida como sendo o horizonte *datum* (camada média) para a geração do mapa de contorno estrutural, por estar localizada na porção central da seqüência sedimentar da área de estudo.

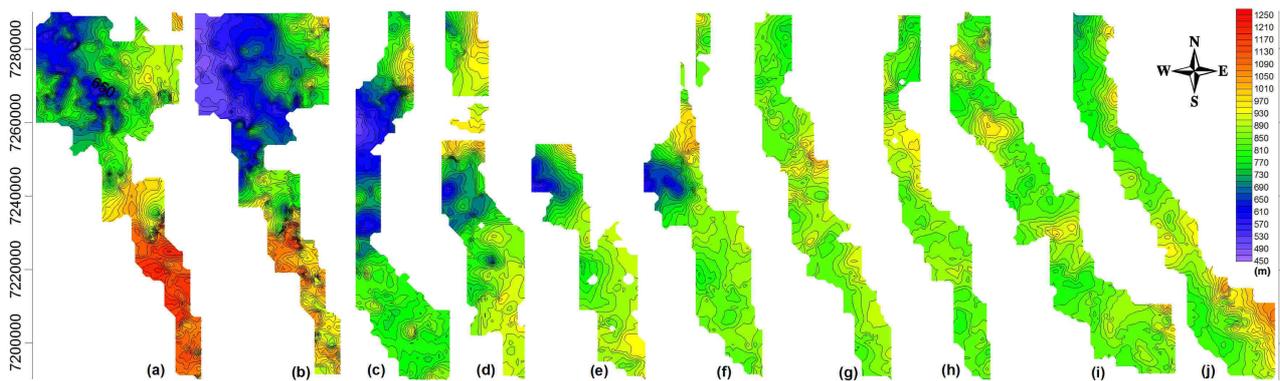


Figura 16 – Mapas de contorno estrutural dos topos aflorantes das unidades geológicas da área de estudo: (a) Fm. Butucatu/Pirambóia; (b) Fm. Rio do Rasto; (c) Fm. Teresina; (d) Fm. Serra Alta; (e) Fm. Iratí; (f) Fm. Palermo; (g) Fm. Rio Bonito; (h) Gr. Itararé; (i) Fm. Ponta Grossa; (j) Fm. Furnas.

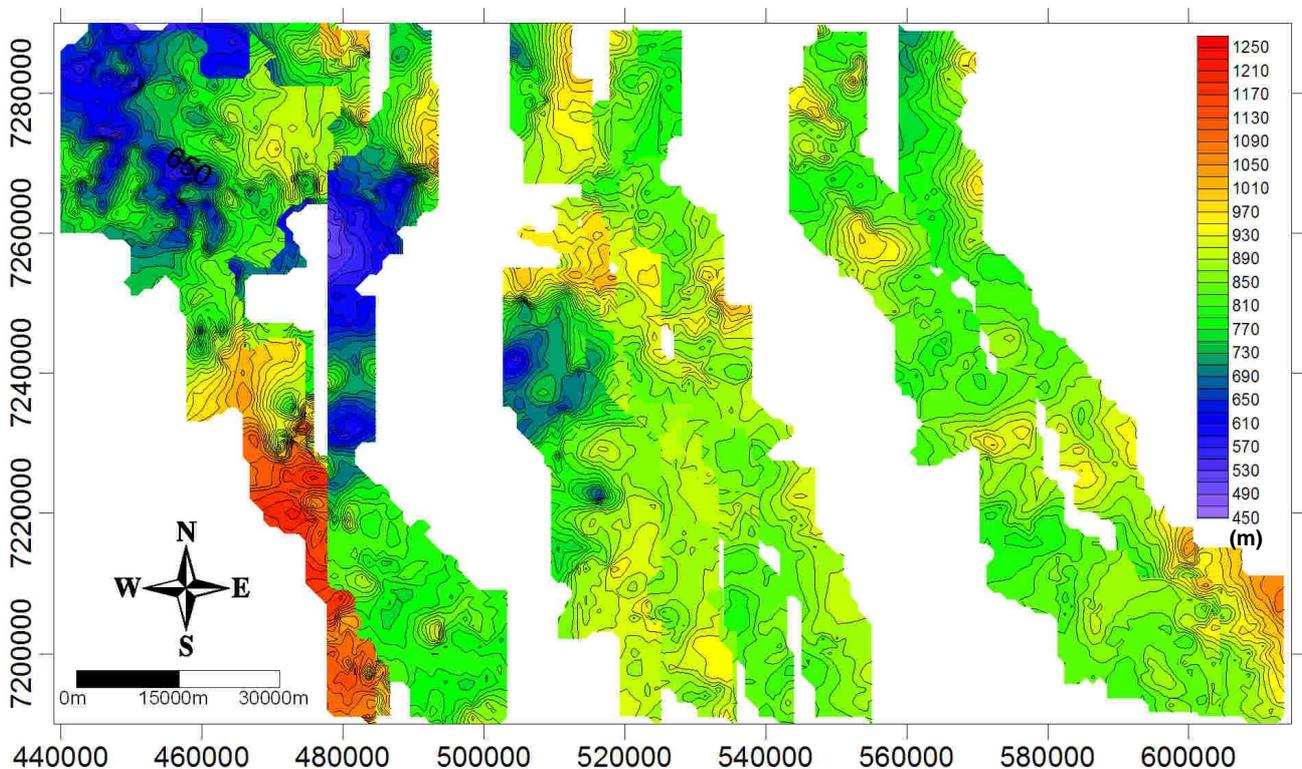


Figura 17 – Mapa de contorno estrutural geral da área, gerado a partir da sobreposição de todos os contornos estruturais.

O procedimento aplicado para a geração do horizonte fantasma obedece a seguinte rotina: gerou-se um novo *grid* para cada unidade → *data* (abre o arquivo ASCII original com dados X,Y,Z) → interpolou-se por regressão polinomial de primeira ordem todas as unidades, assim obtendo-se uma superfície de tendência que representaram e disponibilizaram o mergulho aproximado de cada unidade (formação) → salva nome do arquivo .grd. Após geradas e determinadas todas as superfícies de primeira ordem, foram efetuados translações, ou rebatimentos dos dados referentes a estas unidade para um único horizonte, este, conforme descrito anteriormente, a formação Palermo. Seguindo a função matemática ($C=A-B$), foi aplicado um procedimento onde obteve-se os valores médios, em metros, das diferenças altimétricas entre cada superfície de primeira ordem e a superfície da Formação Palermo. Desta forma foi adotada a seguinte rotina: clica-se em *grid* → *math...* → escolhe-se primeiro o *grid* (A) que foi indicado para ser o horizonte médio. Em seguida adiciona-se o segundo *grid* (B), este referente a qualquer outra superfície de primeira ordem, atribui-se então um nome ao arquivo de saída em formato .grd (C).

Com os *grids* resultantes dos cálculos efetuados, coletaram-se os valores centrais médios altimétricos de cada uma das unidades da área. A diferença das distâncias entre cada superfície e a superfícies da Formação Palermo serviu para transacionar todas os mapas de contorno para um mesmo horizonte, utilizando uma linha aproximadamente ortogonal às superfícies de tendência de 1ª ordem. Para o rebatimento das formações, as diferenças foram somadas ou subtraídas dos mapas de contorno estruturais primários. Após esta fase de translação dos pontos referentes a cada mapa, os mesmo foram exportados em formato .txt, e inseridos em uma tabela Excel. Primeiramente foram excluídos os pontos do *grid* sem dados reais, gerados pela exportação, e posteriormente por meio de fórmulas de adição ou subtração, todas as informações referentes à altitude foram calculadas, assim rebatendo numericamente todos os dados dos mapas de contorno estrutural para um mesmo horizonte e salvando todos em um arquivo de texto. Todo o procedimento acima descrito pode ser representado conforme o esquema simplificado da Figura 18.

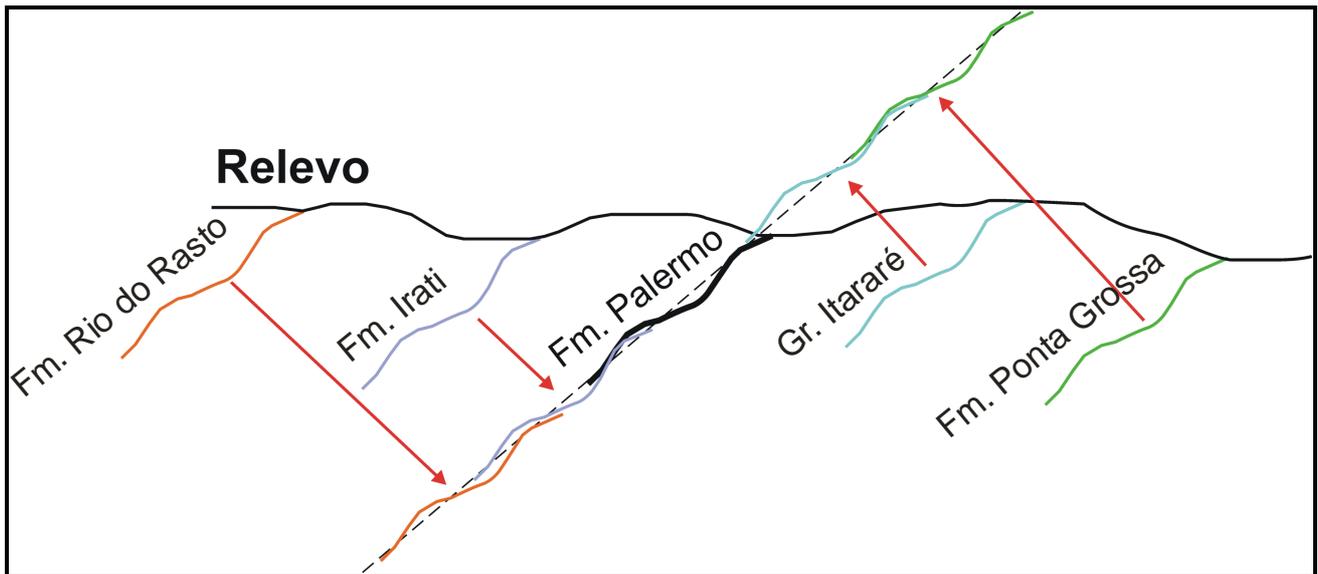


Figura 18 - Esquema geral demonstrando a geração do mapa de contorno estrutural reconstituído do horizonte fantasma ao nível da Formação Palermo.

Com a utilização do programa Surfer 8, foram interpolados por krigagem as informações geradas pelo rebatimento das superfícies, o que gerou um mapa de contorno estrutural representado pela união de todos os níveis rebatidos (Figura 19).

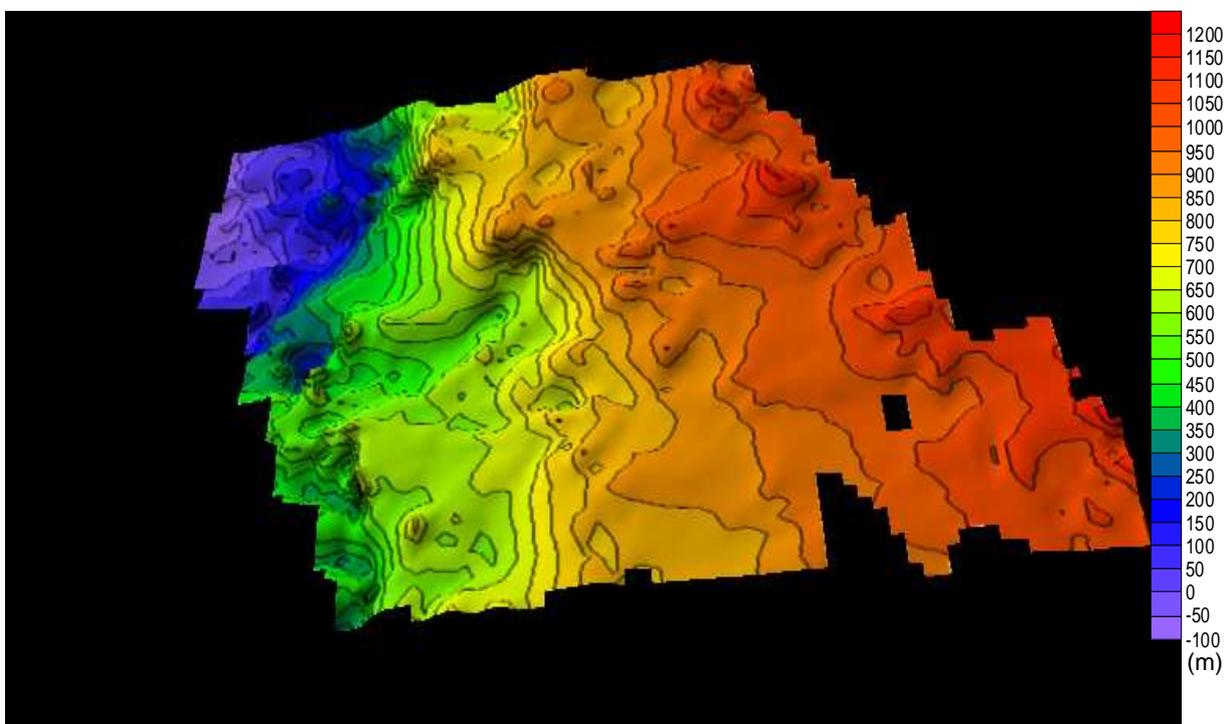


Figura 19 - Mapa de contorno estrutural reconstituído do horizonte fantasma ao nível da Formação Palermo.

O arquivo da Figura 19 foi exportado com o formato *shapefile* e carregado no projeto de interpretação dos lineamentos previamente criado em ArcMap 8.3.

Visando interpretar novos lineamentos, foram sobrepostos o mapa de contorno e as feições lineares previamente identificadas em imagens SRTM e Landsat. A partir desta análise, foi possível caracterizar novas estruturas lineares, fornecendo um mapa com os lineamentos de ambas às interpretações, representando desta forma a compartimentação estrutural da área (Figura 20).

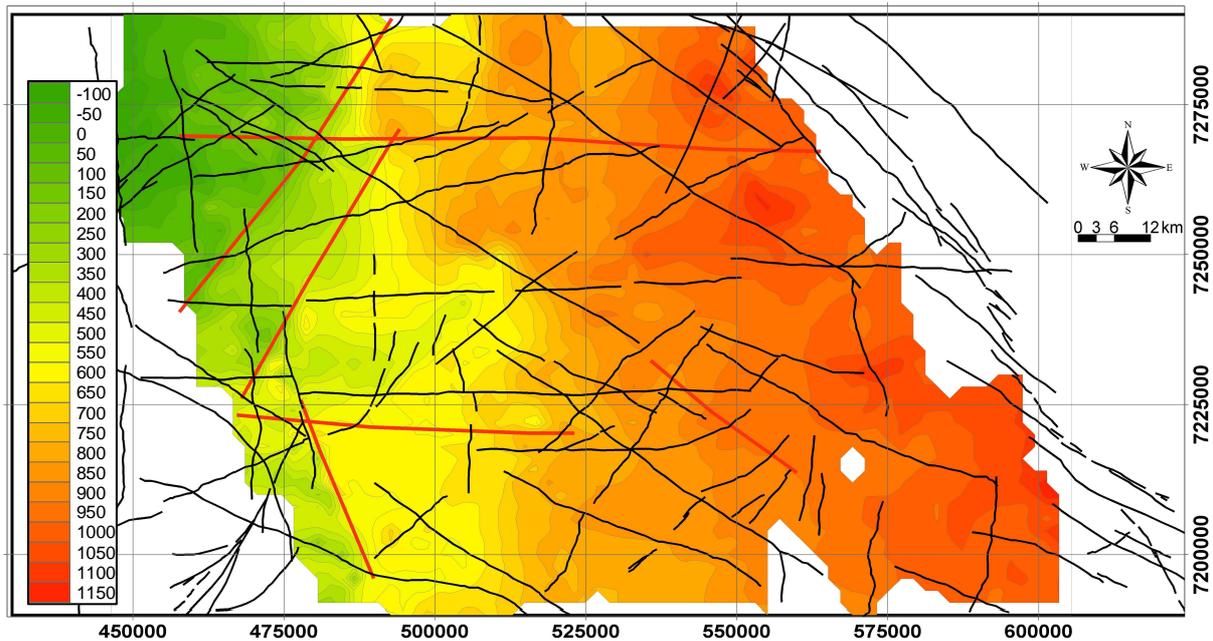


Figura 20 – Traçado final dos lineamentos SRTM/Landsat (preto), sobrepostos ao mapa de contorno estrutural e interpretações complementares (vermelho).

4.1.4 Interpretação em mapas aeromagnetométricos

A aeromagnetometria tem sido utilizada amplamente no reconhecimento de grandes zonas de falhas de diversas direções na porção sul-sudeste do Brasil (Ferreira, 1982a,b, Zalán *et al.* 1990). Estes estudos contribuíram para melhorar a caracterização do arcabouço estrutural da Bacia do Paraná (Portela Filho *et al.*, 2002).

Com o objetivo de coletar, em mapas aeromagnetométricos, informações estruturais derivadas de fontes profundas e correlacioná-los com dados observados em sensores remotos de superfície, foram gerados diversos mapas geofísicos com vários parâmetros.

Os dados magnetométricos originais foram cedidos pela CPRM ao LPGA/UFPR na forma de malha regular (1000 x 1000m) e nivelados para uma altitude de 1000 m. Convém salientar que a área de estudo apresenta uma porção com falta de dados magnetométricos, desta forma dificultando a análise (Figura 21).

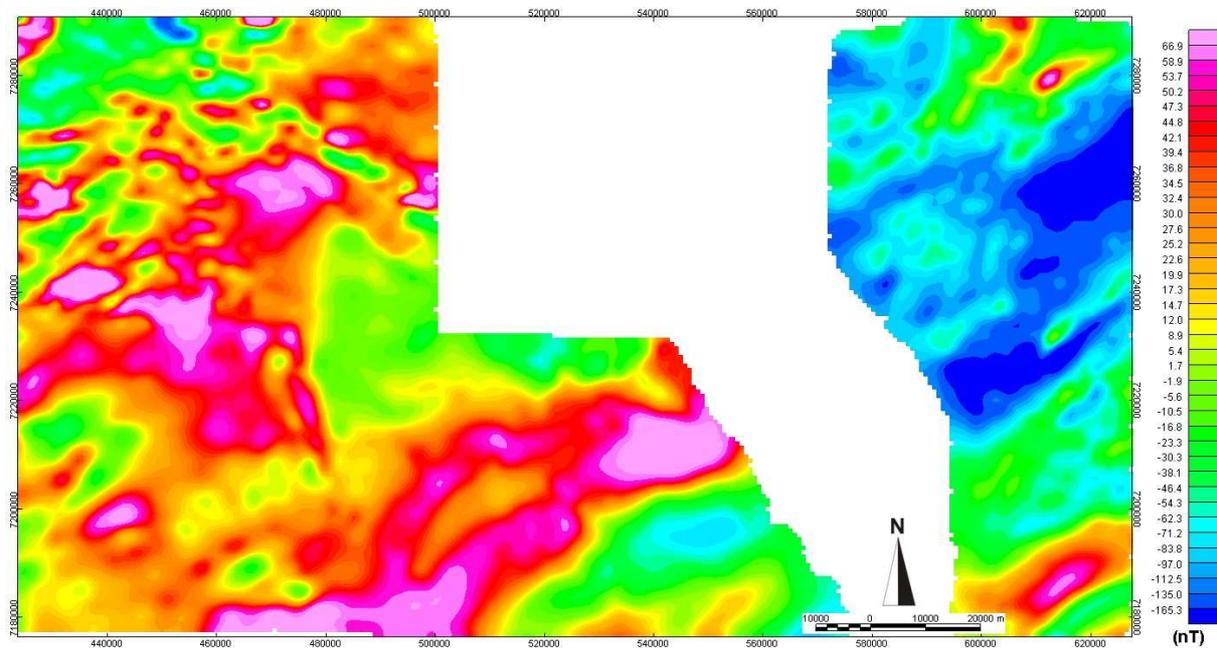


Figura 21 – Mapa aeromagnetométrico original.

Com o objetivo de mapear os principais lineamentos em subsuperfície, a partir de seus sinais em grandes profundidades, os dados originais foram continuados para uma altura de 5000 metros.

Inicialmente os dados originais foram recortados para abrangerem somente a porção que compreende a área de estudo. Sobre este *grid*, diversos métodos de realce de anomalias foram utilizados, baseados na literatura internacional conforme abaixo.

Os mapas gerados e utilizados foram (Figura 22):

- Mapa magnetométrico original (CPRM), unidade em nT;
- Mapa magnetométrico continuado a 5000m, unidade em nT;
- Mapa da fase do sinal analítico (TDR) – (Miller & Singh, 1994 a,b).

$$TDR = (dT/dz) / [(dT/dx)^2 + (dT/dy)^2]^{1/2}$$
 - unidade em radianos (rad), onde dT/dz, dT/dx e dT/dy são as derivadas do campo magnético nas direções x, y, z, respectivamente;

- Mapa da soma dos valores absolutos das derivadas horizontais (HDSUM) – (Pitas, 2000). $HDSUM = |dT/dx| + |dT/dy|$ - unidade em nT/m;
- Mapa do gradiente horizontal total realçado (EHD) – (Fedi & Florio, 2001). $EHD = [(d\Phi/dx)^2 + (d\Phi/dy)^2]^{1/2}$, onde $\Phi =$ somatório das derivadas verticais de ordem n (dT/dz^n) e $n = 1, 2, 3 \dots n$ - Unidade em nT/mⁿ;
- Mapa do sinal analítico composto (CAS) – (Debeglia *et al.*, 2005). $CAS = [(d\Phi/dx)^2 + (d\Phi/dy)^2 + (d\Phi/dz)^2]^{1/2}$ – unidade em nT/mⁿ;
- Mapa da fase do sinal analítico do quadrado do campo magnético - (TDRQT) (Ferreira, 2006 em elaboração). $TDRQT = (dQT/dz)/[(dQT/dx)^2 + (dQT/dy)^2]^{1/2}$ – unidade em radianos (rad).

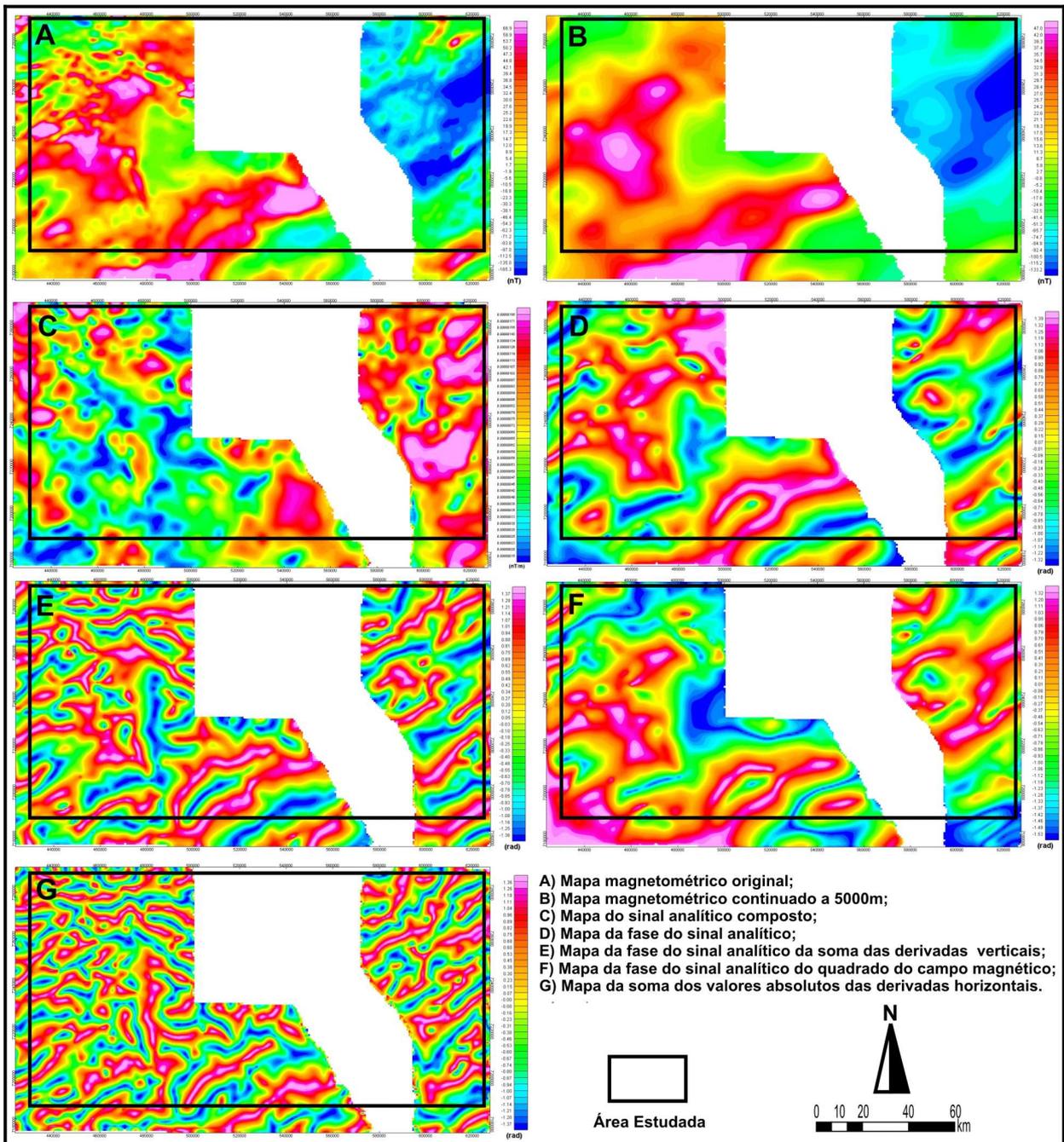


Figura 22 – Mapas aeromagnetométricos utilizados.

Dos grandes lineamentos de Zalán *et al.* (1990), apresentam-se de modo expressivo nos dados interpretados a Zona de Falha Cândido de Abreu / Campo Mourão o Lineamento do Rio Piquiri e a Zona de Falha de Taxaquara. Em função da ausência de dados magnéticos na parte central da área de estudo, a Zona de falha do Rio Alonzo não foi caracterizada (Figura 23).

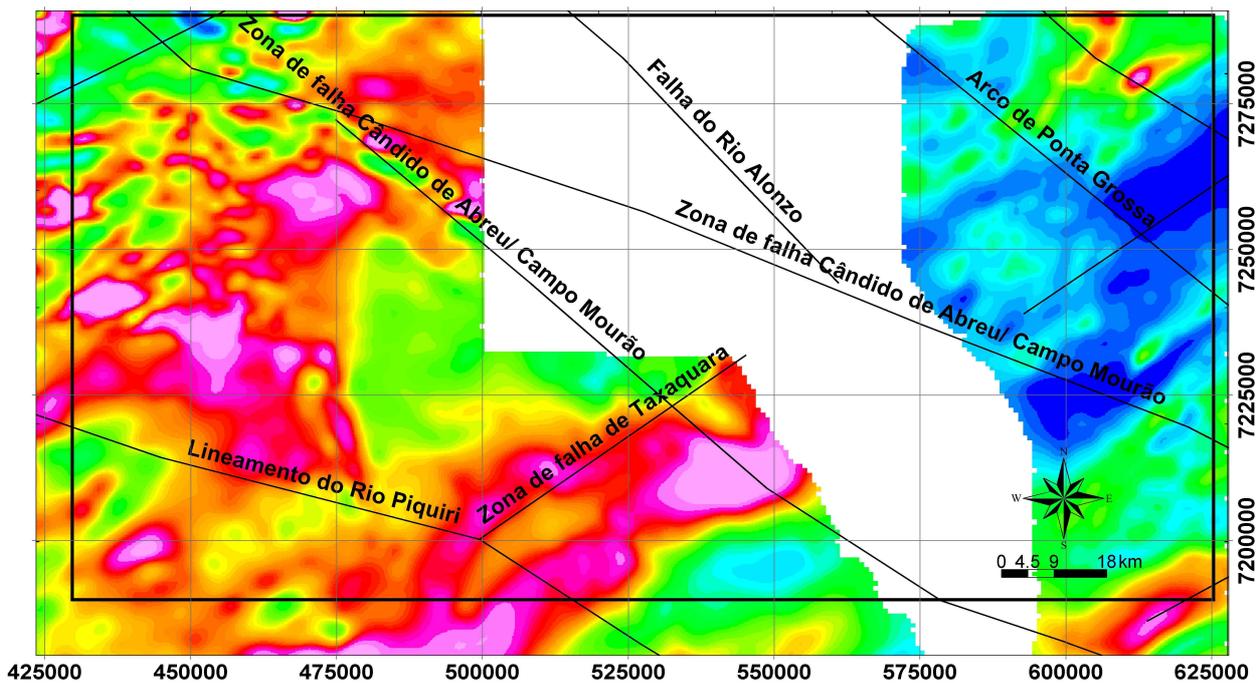


Figura 23 – Mapa magnetométrico original da área, sobreposto aos lineamentos definidos por Zalán *et al.* (1990).

Com objetivo de localizar lineamentos derivados de fontes profundas, procurou-se interpretar as estruturas de direção NW-SE e NE-SW. Posteriormente, as direções N-S e E-W foram delineadas. Aplicando esta seqüência em todos os mapas gerados, originou-se uma gama de informações que alimentaram o banco de dados e puderam ser correlacionadas às interpretações estruturais obtidas a partir de sensores de superfícies.

Para cada mapa geofísico, foram criados quatro arquivos *shapefile*, cada um correlacionado a uma direção de interpretação. Ao final, disponibilizou-se um total de vinte e oito arquivos, os quais foram sobrepostos entre si e utilizados para a análise final dos lineamentos presentes nos mapas magnetométricos. Esta interpretação final levou em consideração a freqüência e repetição dos mesmos lineamentos em uma mesma área. Assim, os lineamentos que ocorreram na maioria dos mapas, foram preservados, disponibilizando um traçado final mais representativo das principais feições presentes (Figura 24).

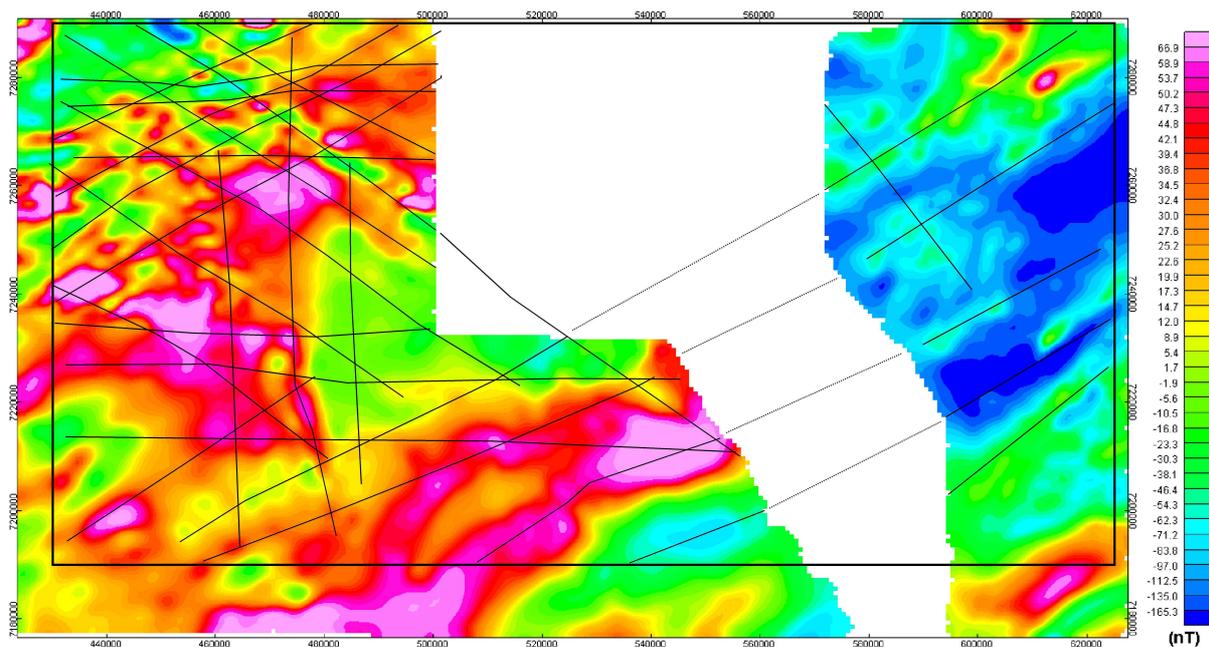


Figura 24 – Mapa magnetométrico original da área sobreposto as interpretações magnéticas finais.

Ao correlacionar os dados de superfície com os referentes a fontes profundas, encontrou-se prováveis correspondentes. Conforme pode-se observar na Figura 25 ocorrem pequenas variações quanto à sobreposição das interpretações. Entretanto, deve-se levar em consideração as diferenças entre as resoluções dos dados.

Por fim, foi gerado um mapa de interpretação magnética estrutural da área, o qual foi relacionado com informações de superfície. Assim, foi possível concluir que os lineamentos visíveis na superfície e que apresentaram correlatos com os observados em mapas magnetométricos são prováveis falhas que condicionam estruturalmente a coluna sedimentar inteira, desde o embasamento até a superfície. Por outro lado, as feições lineares magnéticas que não guardam correspondência com os lineamentos de superfície foram interpretados como estruturas presentes no embasamento, sem reflexo, com pouca influência ou com atuação nas unidades mais profundas da bacia. Não sendo correlacionáveis com as estruturas presentes nas porções sedimentares aflorantes da área (Figura 26).

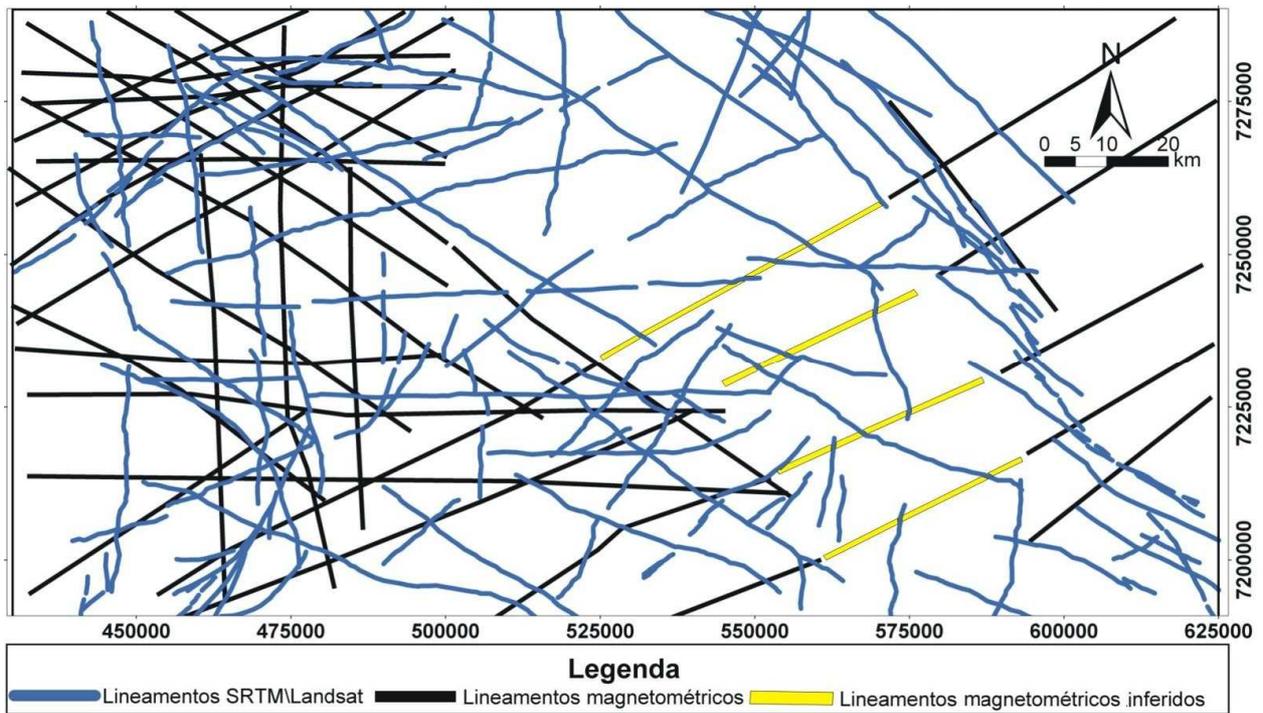


Figura 25 – Lineamentos interpretados em imagens SRTM/Landsat , sobrepostos a lineamentos magnéticos.

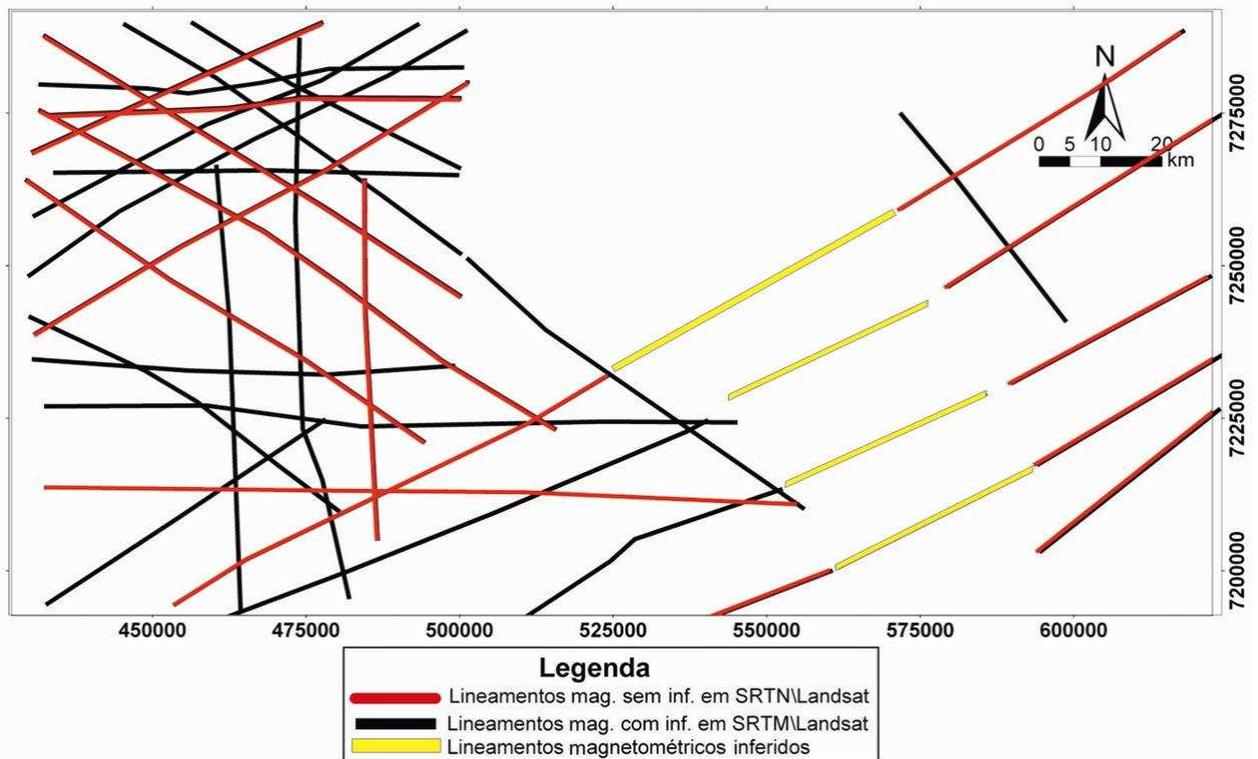


Figura 26 – Interpretação dos lineamentos magnéticos com ou sem correlatos em superfície.

4.1.5 Interpretação em imagens em escala de detalhe (1:10.000)

A proposta de estudo em multi-escala levou-nos a selecionar uma porção da área regional onde foram efetuados trabalhos de detalhe. Visando correlacionar a região escolhida com os lineamentos previamente interpretados, optou-se por localizar uma área aflorante onde ocorrem rochas expostas com inúmeras informações geológicas.

Como descrito no Capítulo 1, a área de detalhe localiza-se na porção nordeste da área regional de estudo, próximo a cidade de Tibagi, conhecida como Morro do Jacaré (Figura 27).

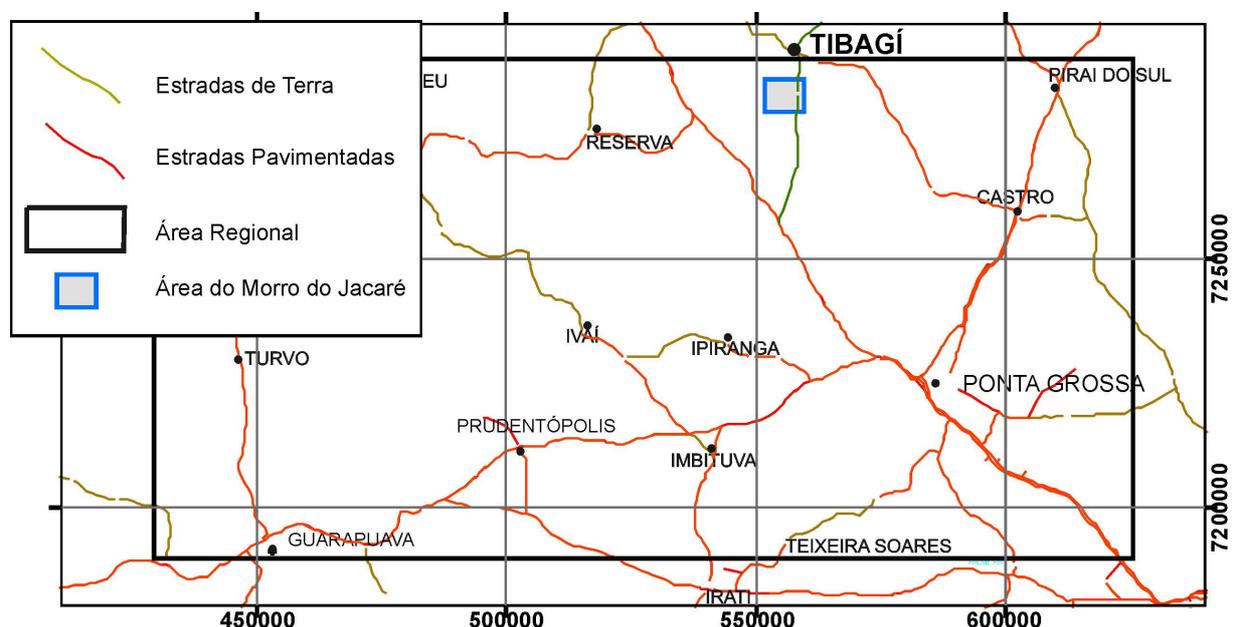


Figura 27 - Mapa de localização da área do Morro do Jacaré próximo da cidade de Tibagi. (mod. do mapa rodoviário do Paraná, DNER, 2001).

Para a análise da área do Morro do Jacaré, foram utilizadas fotografias aéreas em escala 1:10.000 para identificar os principais elementos estruturais. O traçado destas feições foi realizado diretamente no contexto do programa de modelagem tridimensional PETREL.

Primeiramente foram inseridos dados referentes ao relevo, utilizando-se a reconstituição aerofotogramétrica do Morro do Jacaré, obtida pelo projeto IMAGE, (*Imageamento 3D e arquitetura de elementos essenciais de sistemas petrolíferos*, 2004-2006), referentes a dados pontuais em formato texto com informações X,Y,Z e

com resolução média de 10 metros. As principais etapas para a obtenção destes dados seguem os métodos descritos por Mitishita (1986) como sendo:

- **Recobrimento Aerofotogramétrico:** Foi realizado o recobrimento aerofotogramétrico (tons de cinza) na escala 1:15.000, empregando câmera aerofotogramétrica Wild RC-10, com distância focal nominal de 153.000 mm. Duas faixas foram necessárias para a cobertura da área de estudo. Cada uma das faixas possui cinco fotos com recobrimento (sobreposição) longitudinal de 60% e lateral de 30%. Imagens analógicas (diafilmes) foram obtidas para a realização da aerotriangulação.
- **Obtenção de aerofotos digitais:** As aerofotos digitais foram obtidas com a digitalização do filme analógico em Scanners fotogramétricos. Foi empregada a resolução de 0,025 mm no processo de digitalização, resultando um arquivo de 90 Mb para cada imagem.
- **Pontos de apoio e pontos fotogramétricos:** Onze pontos de apoio foram posicionados no interior da área, nas regiões com recobrimento entre fotos e com espaçamento de no máximo três bases. O levantamento das coordenadas planialtimétricas destes pontos empregou técnicas de GPS relativo e RTK (*Real-Time Kinematic*). RTK é um processo onde as correções do sinal do GPS são transmitidas em tempo real, a partir de uma estação de referência de localização conhecida, para uma ou mais estações receptoras remotas (*rove*). A utilização do GPS com capacidade RTK pode compensar efeitos de atraso devido à atmosfera, erros orbitais, e outras variáveis na geometria GPS, apresentando acurácia posicional da ordem de centímetros.
- **Aerotriangulação:** O procedimento fotogramétrico de aerotriangulação resume-se nas etapas de leitura dos modelos fotogramétricos e processamento do bloco. As observações fotogramétricas foram processadas para a correção dos erros sistemáticos do trabalho do filme e distorções de lentes, resultando um conjunto de pontos e coordenadas fotogramétricas para o processamento da aerotriangulação. A determinação das coordenadas dos pontos fotogramétricos, necessários para a orientação absoluta dos dados, foi executada a partir de um ajustamento simultâneo entre modelos.

- **Perfilagem:** Os modelos fotogramétricos que recobrem a região do Morro do Jacaré foram orientados absolutamente numa estação fotogramétrica digital para a obtenção da malha de pontos densa, que permite a definição matemática do relevo da região. O processo empregado foi manual e necessitou de um operador (fotogrametrista) para a realização das observações fotogramétricas. O tempo gasto para a realização de 250 perfis fotogramétricos foi de oito horas, resultando um total aproximado de 48.000 pontos.

A partir destes dados, no programa PETREL, gerou-se uma superfície do relevo da área (MDE), seguindo a mesma seqüência descritas no item 4.1.3. Sobre o MDE, foi sobreposta a fotografia aérea central, assim disponibilizando uma imagem tridimensional da área (Figura 28).

Como passo seguinte, interpretações dos lineamentos da área do Morro do Jacaré foram precedidas diretamente sobre a imagem da figura 28. Por estarem em um programa que permite uma visualização 3D, as principais estruturas foram facilmente identificadas, entretanto suas continuações e características verticais seriam refinadas com a utilização de dados do Laser Scanner.

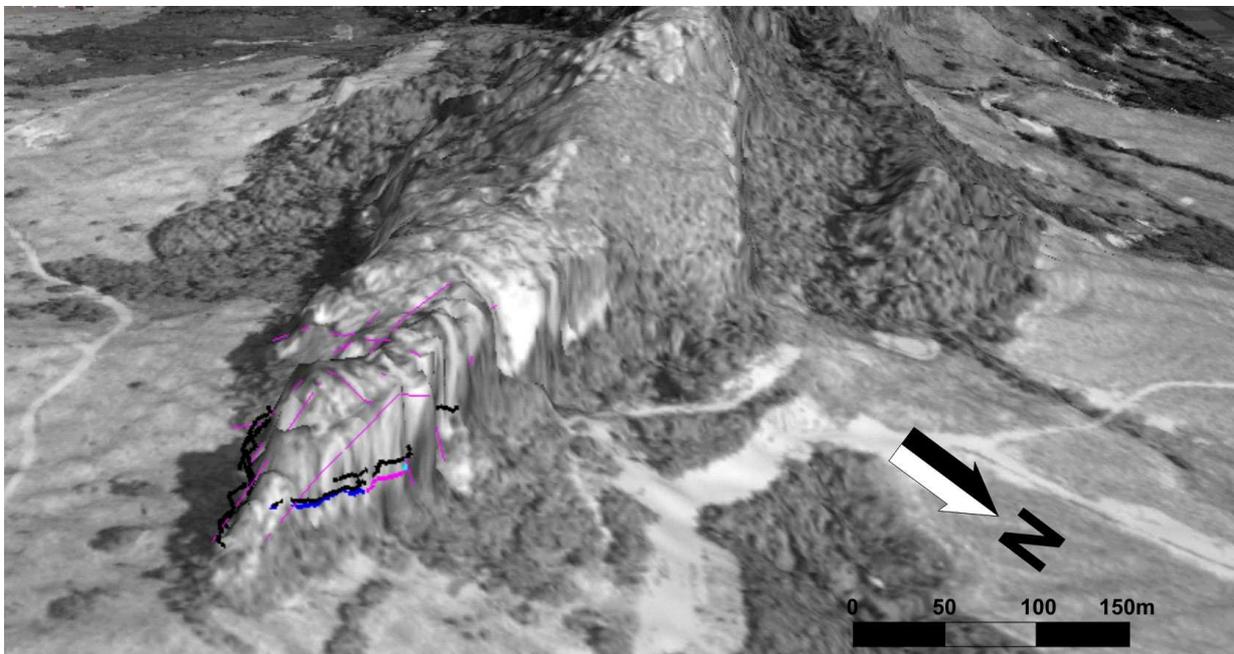


Figura 28 – Visualização tridimensional em PETREL da fotografia aérea 1:10.000 do Morro do Jacaré, sobreposta ao Modelo Digital de Elevação (MDE), com a interpretação dos lineamentos em rosa na superfície do morro.

4.1.6 Aplicação do Laser Scanner na interpretação e modelagem tridimensional de afloramentos

Desenvolvido no Laboratório de Análise de Bacias e Petrofísica – LABAP (Departamento de Geologia, Universidade Federal do Paraná), o projeto IMAGE disponibilizou uma técnica inovadora no âmbito de modelagem 3D e análise em multi-escala na geologia. Utilizando-se de uma ferramenta de imageamento tridimensional de alta-resolução (Laser Scanner), foi efetuado um levantamento pelo método LIDAR (*Light Detection And Ranging*) em toda a porção aflorante da área de detalhe, no caso, o Morro do Jacaré. Este método apresenta amplo potencial para predição e extrapolação da geometria dos atributos de elementos essenciais de sistemas petrolíferos (fraturas, falhas e feições sedimentares), em escalas diversas daquela em que foi efetuado o imageamento.

O sistema Laser Scanner ou LIDAR gera coordenadas tridimensionais de pontos sobre uma superfície num curto intervalo de tempo. Os pulsos de laser são gerados e emitidos pelo sistema com o auxílio de um espelho de varredura, atingindo os objetos. Estes objetos refletem o pulso emitido e parte de sua energia retorna para o sistema. Assim, através do intervalo de tempo decorrido entre a emissão e o retorno do pulso, é obtida a medida de distância entre o sensor e o objeto iluminado (Dalmolin & dos Santos, 2004).

Para um imageamento LIDAR terrestre, foi adotado um procedimento básico. Este consistiu primeiramente numa abordagem visual de campo do afloramento como um todo. Ao observar as faces aflorantes do Morro do Jacaré, decidiu-se iniciar a aquisição em sua porção sul, contornando sua cunha frontal e finalizar na face norte. Deste modo foram necessárias diversas mudanças, ou migrações de equipamento (*ScanWord's*), para cobrir toda a área desejada no levantamento.

Definidas a ordem do levantamento, deslocou-se e instalou-se o equipamento a uma distância aproximada de 60 metros da parede Sul. O Laser Scanner inicialmente foi acoplado sobre um tripé devidamente cravado ao solo e calado por meio de uma bolha niveladora. Cabos de energia e rede, referentes à ligação do equipamento a baterias e a um *laptop*, respectivamente, são conectados. Após alguns minutos, necessários para a autoconfiguração do aparelho, foi iniciado

o programa CYCLONE, este responsável pela operação do equipamento, aquisição e edição dos dados, e por via serial conectado ao Laser Scanner. Seguiu-se então via computador, a configuração dos parâmetros utilizados, estes referentes à captura de imagens fotográficas do afloramento pelo Scanner, área da janela desejada para o levantamento e o espaçamento entre os pontos que originaram a malha coletada. Este procedimento foi aplicado a todas as migrações do equipamento efetuadas durante a aquisição.

Os trabalhos envolvendo o imageamento tridimensional do Morro do Jacaré foram realizados basicamente em uma etapa de aquisição de nuvens de pontos em campo, o qual consistiu do recobrimento de aproximadamente 675 metros de afloramentos em extensão lateral, cujas escarpas atingem cerca de 50 metros de altura (Figura 29).

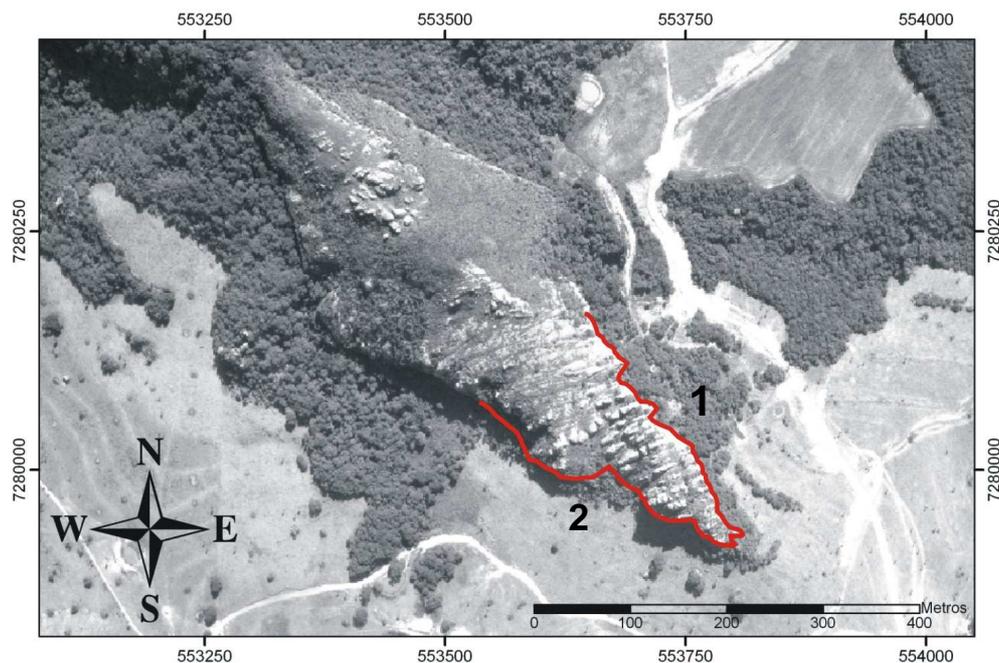


Figura 29 - Área de recobrimento das varreduras (1 Norte, 2 Sul) com o equipamento Laser Scanner.

Um total de 8 *ScanWorld's* (posições onde o Laser Scanner foi armado para realizar uma varredura) de foram criados para cobrir toda a área, cujas posições podem ser observadas na Figura 30. O espaçamento entre os pontos de varredura ficou situado entre 2 e 10 cm, dependendo de quão significativo fosse a porção imageada, assim contabilizando um total de 19.075.487 pontos, conforme a Tabela 1.

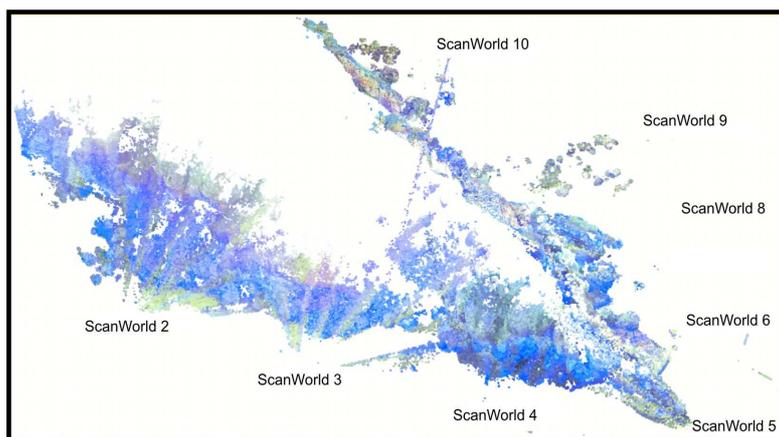


Figura 30 - Locais do posicionamento do equipamento Laser Scanner (*ScanWorld*) e as nuvens de pontos obtidas.

ScanWorld	Nome	Pontos lidos
1	<i>ScanWorld 2</i>	5.955.606
2	<i>ScanWorld 3</i>	1.655.740
3	<i>ScanWorld 4</i>	2.755.384
4	<i>ScanWorld 5</i>	1.208.219
5	<i>ScanWorld 6</i>	1.146.861
6	<i>ScanWorld 8</i>	3.096.717
7	<i>ScanWorld 9</i>	1.065.817
8	<i>ScanWorld 10</i>	2.191.143
	Total	19.075.487

Tabela 1 - Planilha com pontos obtidos em cada *ScanWorld*.

Durante a aquisição, inúmeros pontos não forneceram informações das rochas do afloramento. Em laboratório, tais dados, relacionados a vegetação, cercas, gotas, pássaros e blocos rolados, tiveram de ser tratados e eliminados. Os pontos remanescentes foram triangulados, resultando em um total de 15 superfícies ou *meshes* que são a representação tridimensional das escarpas do Morro do Jacaré (Figura 31, Figura 32 e Figura 33).

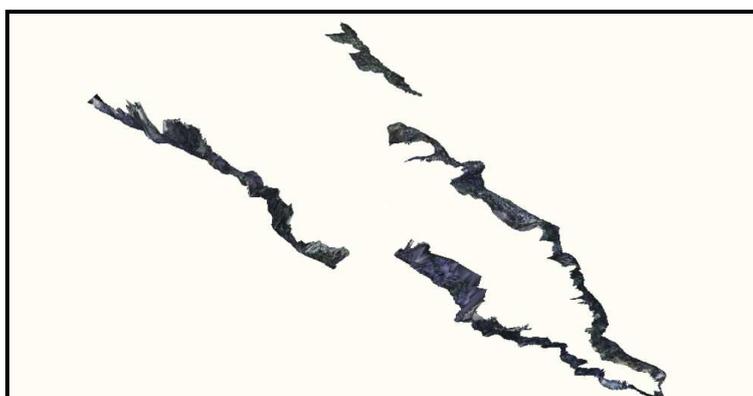


Figura 31 - Modelo tridimensional do Morro do Jacaré (visão superior).

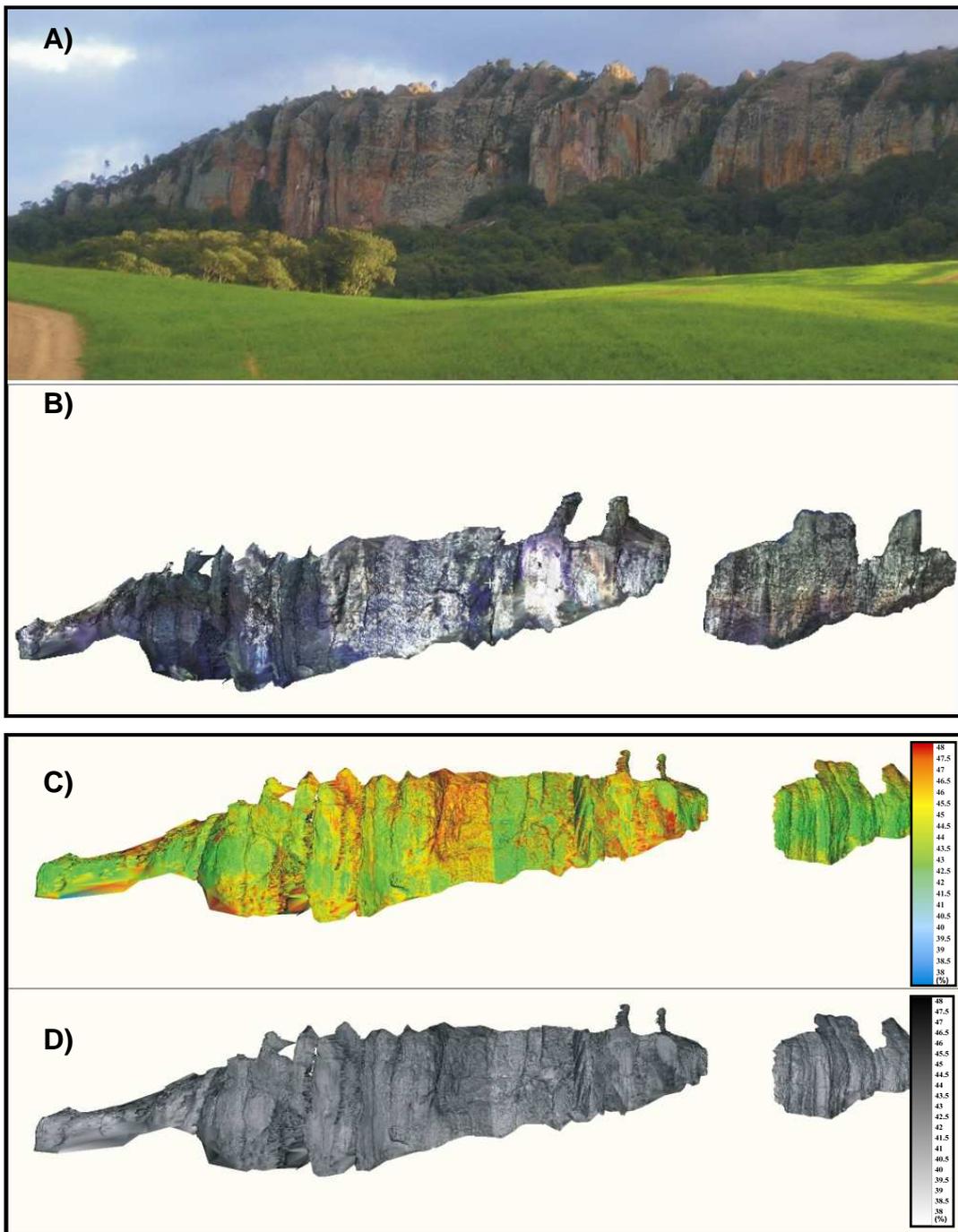


Figura 32 - Modelos tridimensionais do Morro do Jacaré, face norte (visão de NE para SW). A) fotografia convencional; B) modelo com sobreposição das cores de fotografias; C) modelo com valores da intensidade do laser retornado; D) modelo em tons de cinza.

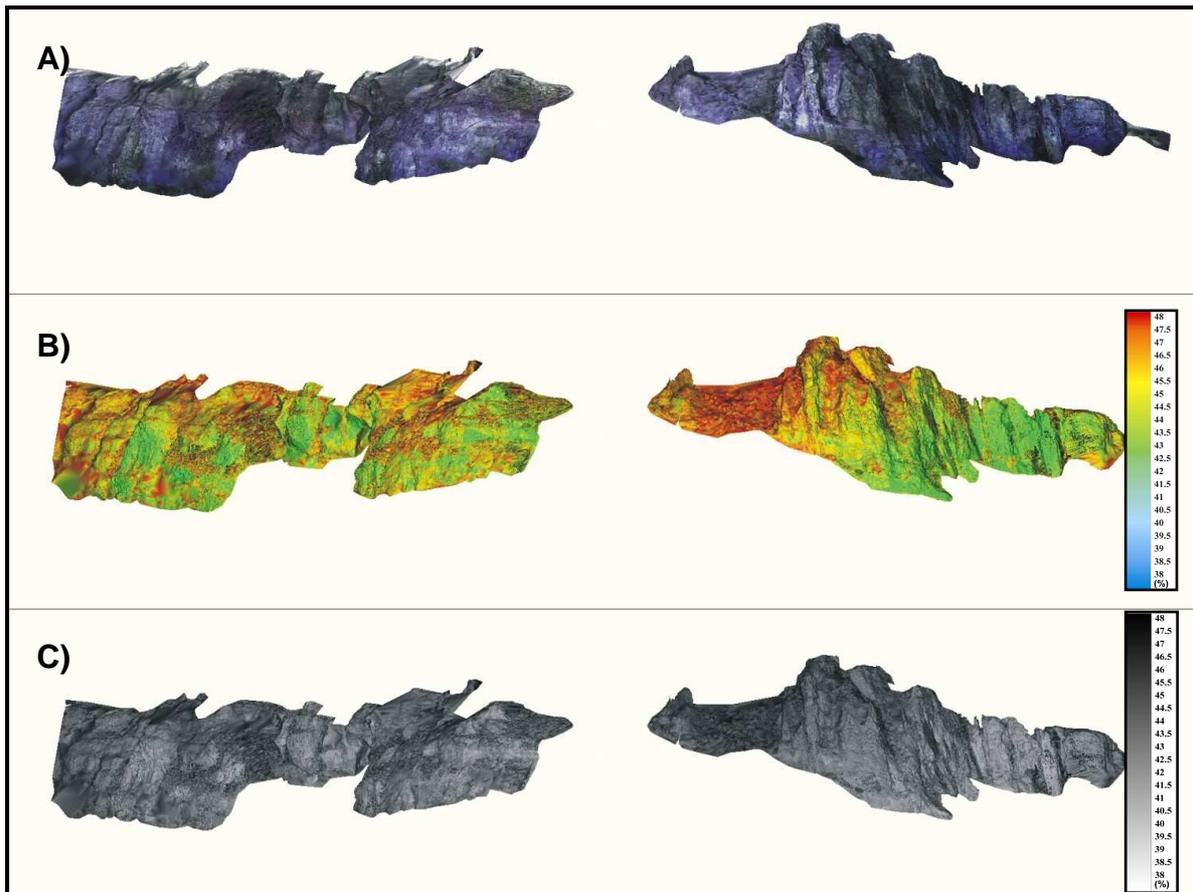


Figura 33 - Modelos tridimensionais do Morro do Jacaré face sul (visão de SW para NE). A) modelo com sobreposição das cores de fotografias; B) modelo com valores da intensidade do laser retornado; C) modelo em tons de cinza.

Com interesse maior em observar, reconhecer e interpretar estruturas tectônicas, bem como feições sedimentares do afloramento, buscou-se identificar nos modelos gerados, planos de fraturas e níveis estratigráficos que correspondessem aos observados em afloramentos. As estruturas rúpteis viriam a ser correlacionadas com as identificadas e interpretadas em fotografias aéreas citadas no capítulo anterior do presente trabalho, como ilustrado a seguir nas Figura 34, Figura 35 e Figura 36, da mesma forma que foram identificadas superfícies sedimentares nos modelos, como mostra a Figura 37.

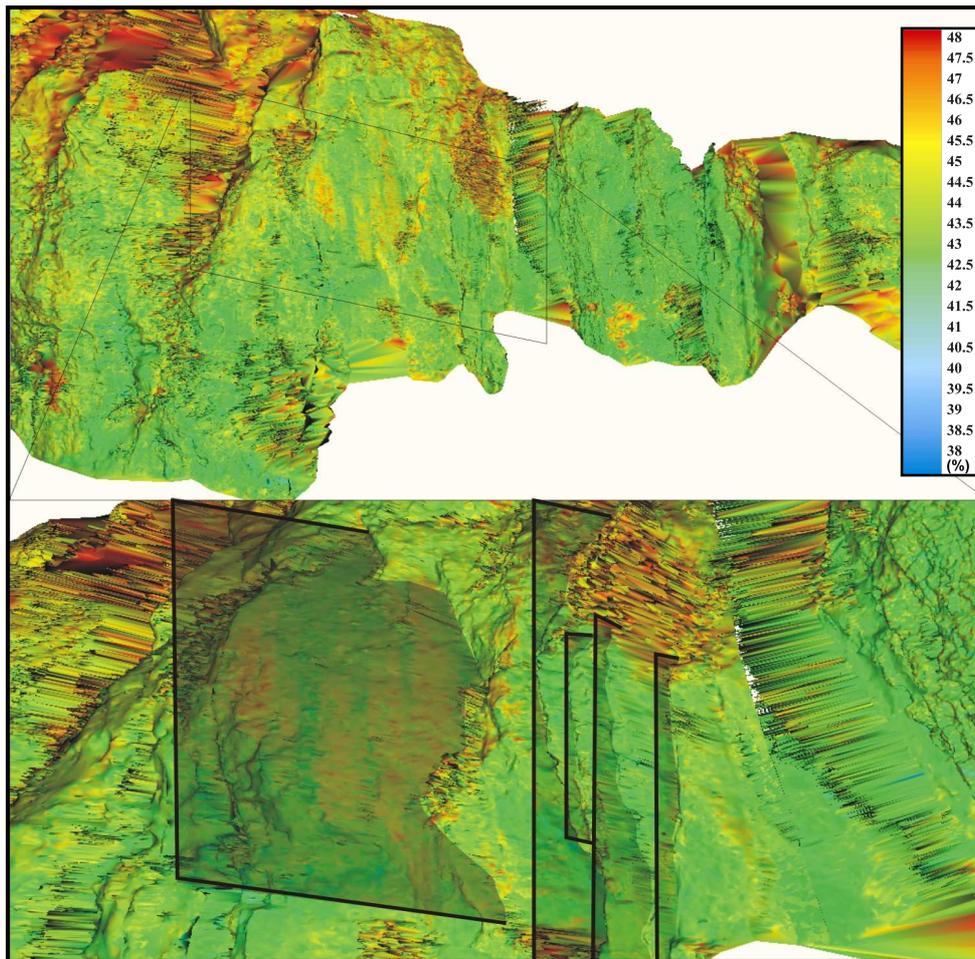


Figura 34 - Planos de fraturas de direção NE. Representação da intensidade de retorno do laser.

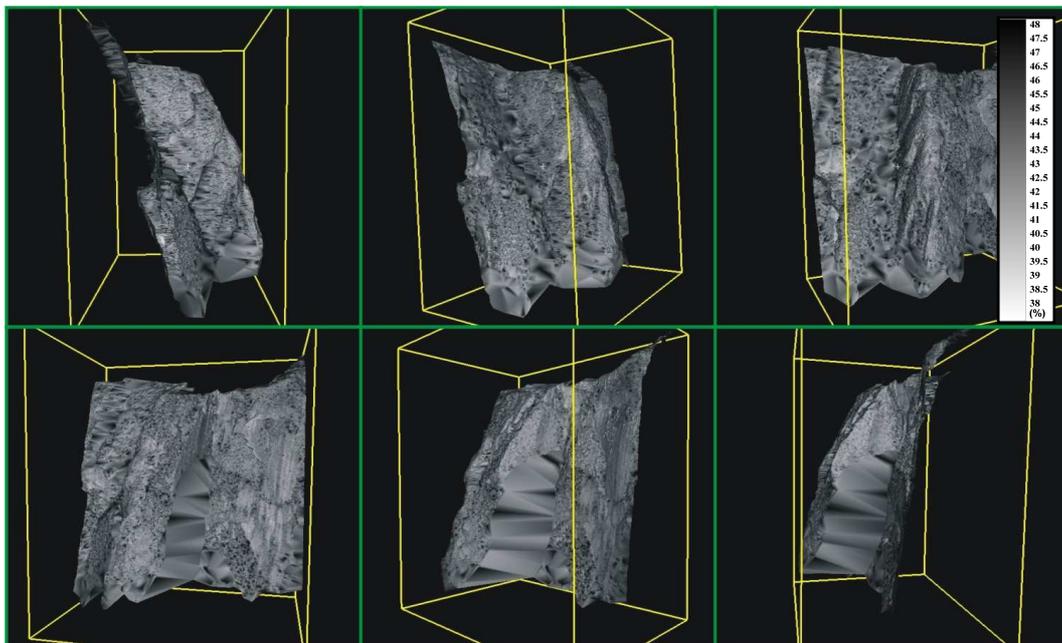


Figura 35 - Representação tridimensional de uma porção contendo planos de falhas escalonadas. Da esquerda para a direita, e de cima para baixo, rotação horária para a superfície.

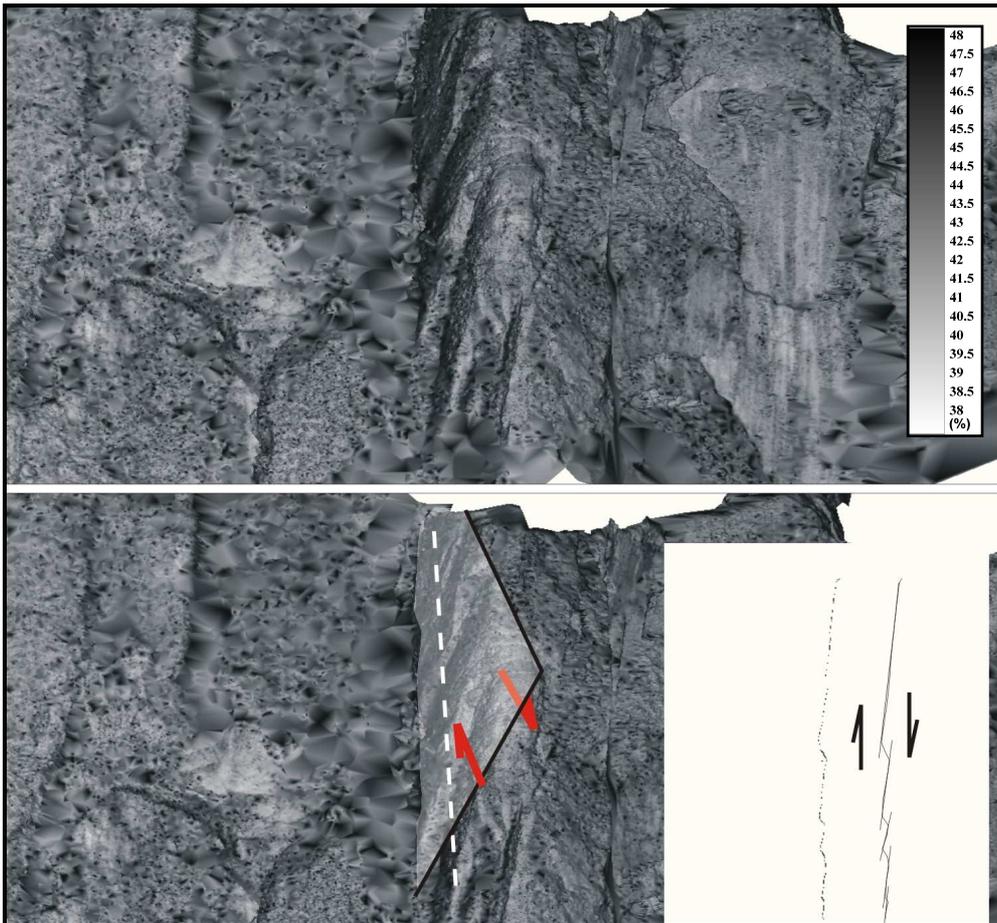


Figura 36 - Detalhe de plano de falha escalonado, cujos indicadores cinemáticos sugerem movimentação oblíqua dextral.

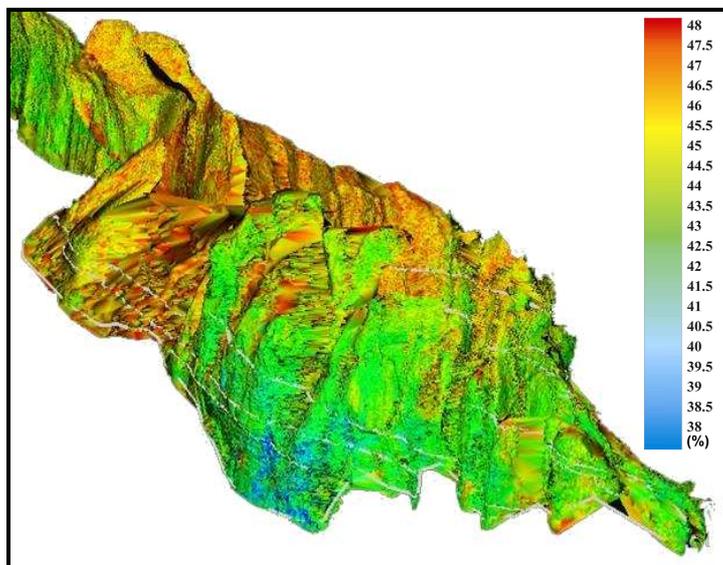


Figura 37 – Imagem 3D da porção sul da cunha do Morro do Jacaré, com interpretações de camadas sedimentares com valores da intensidade do laser retornado.

4.2 LEVANTAMENTO DE CAMPO

Levantamentos de campo foram utilizados para dar apoio à interpretação dos lineamentos em laboratório. Um total de 3 etapas de campo foram realizadas. Estas totalizaram 86 pontos, conforme a Figura 38.

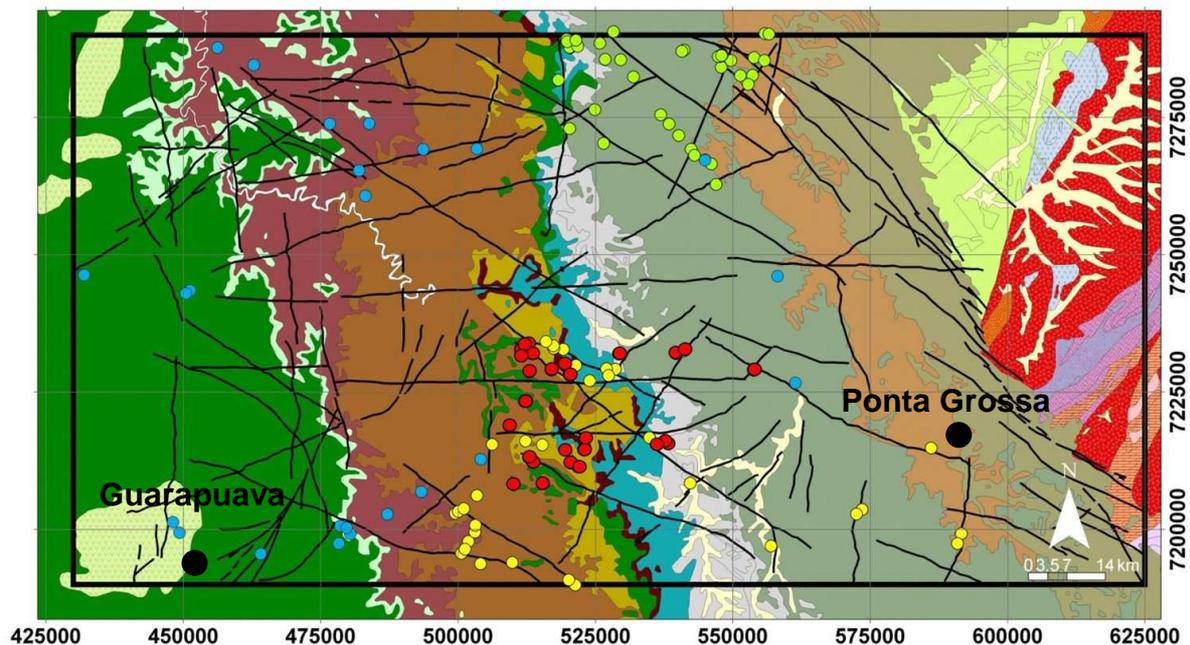


Figura 38 – Mapa de afloramentos descritos. Em verde, pontos descritos por Figueira (2004).

A primeira etapa da pesquisa foi destinada exclusivamente ao reconhecimento da área, das suas principais unidades, e, sobretudo, em recolher informações sobre estruturas tectônicas presentes nos afloramentos. Como segunda etapa desenvolveram-se trabalhos na porção de semidetalhe. Preconizou-se a coleta de informações quanto à forma, geometria, preenchimentos, direções, mergulhos e indicadores cinemáticos de planos de falhas/fraturas.

Com os dados coletados em duas etapas, confeccionou-se um banco de dados com, tabelas, estereogramas, diagramas e rosetas. A partir da análise dos dados processados em laboratório, confirmou-se a presença de duas direções principais (NE-SW e NW-SE) e de outras duas secundárias (E-W e N-S) de falhas/fraturas. Destas, as mais visíveis, presentes em quase todos os afloramentos, apresentaram direções N40-60W e N35-55E. Por vezes, também foram encontrados falhas/fraturas, com direções variando poucos graus em relação a direção E-W e a N-S (Figura 39). Ambas as direções observadas em campo, apresentaram planos com alto ângulo de mergulho. Tendo estas informações disponíveis, confirmou-se

que os principais lineamentos exerciam controle estrutural em toda a área, e, por vezes, ocorriam algumas direções secundárias associadas.

Através da retro-alimentação do banco de dados, os pontos de campo das etapas iniciais foram carregados e sobrepostos aos diversos mapas gerados anteriormente. Em ambiente ArcMap™, estes arquivos foram dispostos em forma de círculos, os quais receberam *hyperlinks*, facilitando a visualização dos dados sobre os mapas contendo os lineamentos. Contudo, foi observado que tais círculos não estavam em parte sequer próximos dos grandes alinhamentos interpretados no início dos estudos, não contribuindo para o entendimento das características das megafeições lineares anteriormente identificadas.

Objetivando-se levantar dados diretamente relacionados aos lineamentos, a terceira etapa de campo, como observa-se na Figura 38, se restringiu a porção central da área de estudo, à área de semidetelhe. Esta fase foi desenvolvida após realizados alguns testes de modelagem, levando-nos a concentrar esforços na caracterização dos lineamentos da área de Prudentópolis. Nesta etapa, os pontos de campo se ativeram em localizar e descrever afloramentos inseridos em regiões próximas às estruturas interpretadas nos sensores remotos. Sendo assim, as informações obtidas originaram diagramas de rosetas, que serviram para constatar se as fraturas/falhas vistas em campo coincidiam com as feições vistas em laboratório (Figura 40). Por fim, os dados coletados foram atribuídos aos lineamentos, de modo a auxiliar a modelagem tridimensional.

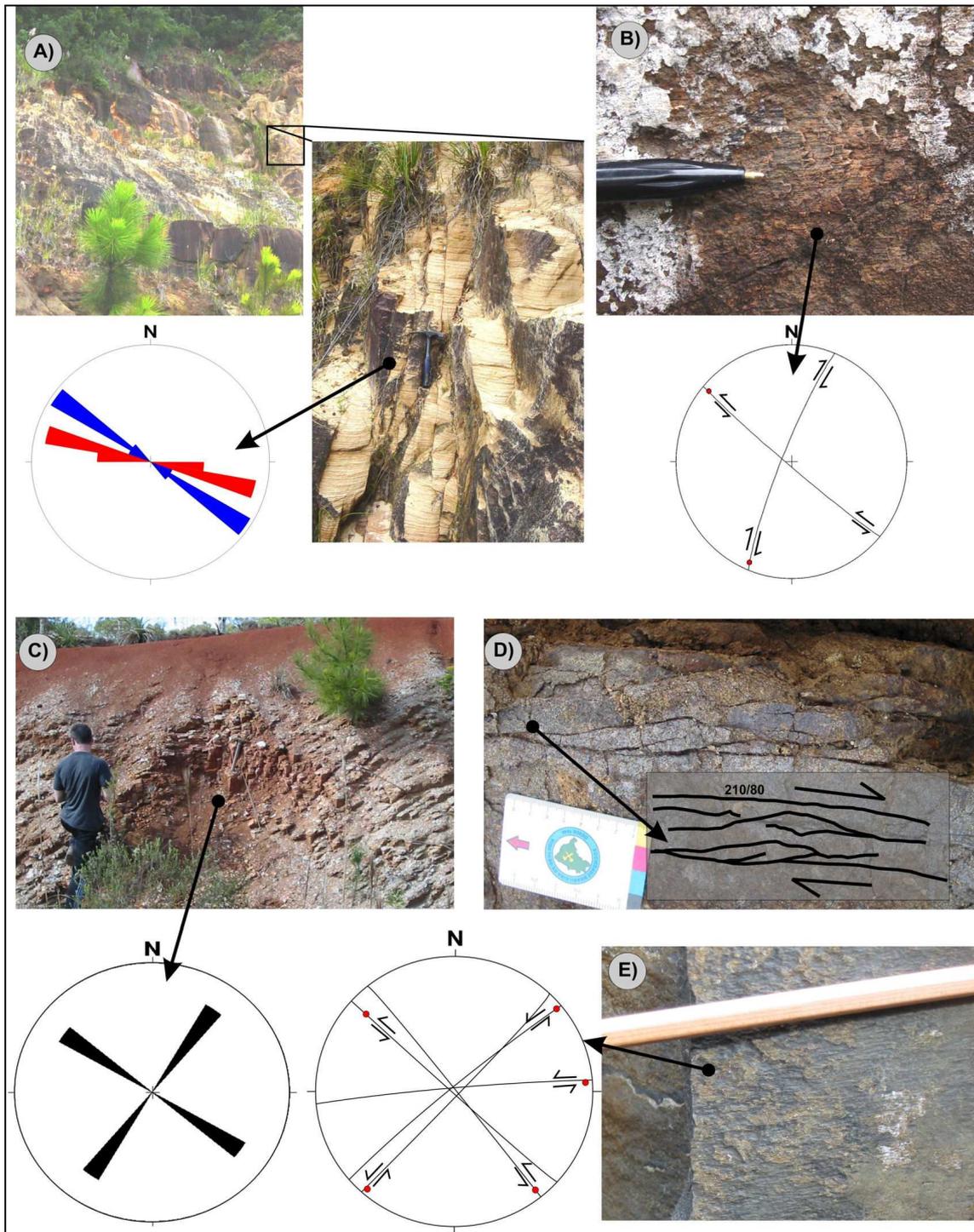


Figura 39 – Exemplos de falhas e fraturas observadas em campo. A) Zona de falha em arenitos da Fm. Botucatu, na Serra da Esperança, com intenso fraturamento em direção NW-SE (Ponto 12); B) Plano de falha estriado com *steps* indicando movimentação sinistral na Fm. Serra Geral, ocorrendo movimentos dextrais no afloramento (Ponto 18); C) Corte de estrada nas proximidades da cidade de Ivaí-PR, demonstrando intenso fraturamento nas direções NW-SE e NE-SW, na Fm. Teresina (Pontos 44); D) Sigmóides em falha, indicando cinemática dextral em afloramento de basalto (Ponto 37); E) Estrias em plano de falha e estereograma (Ponto 81) indicando cinemáticas sinistras em Falhas NE-SW, NW-SE e E-W.

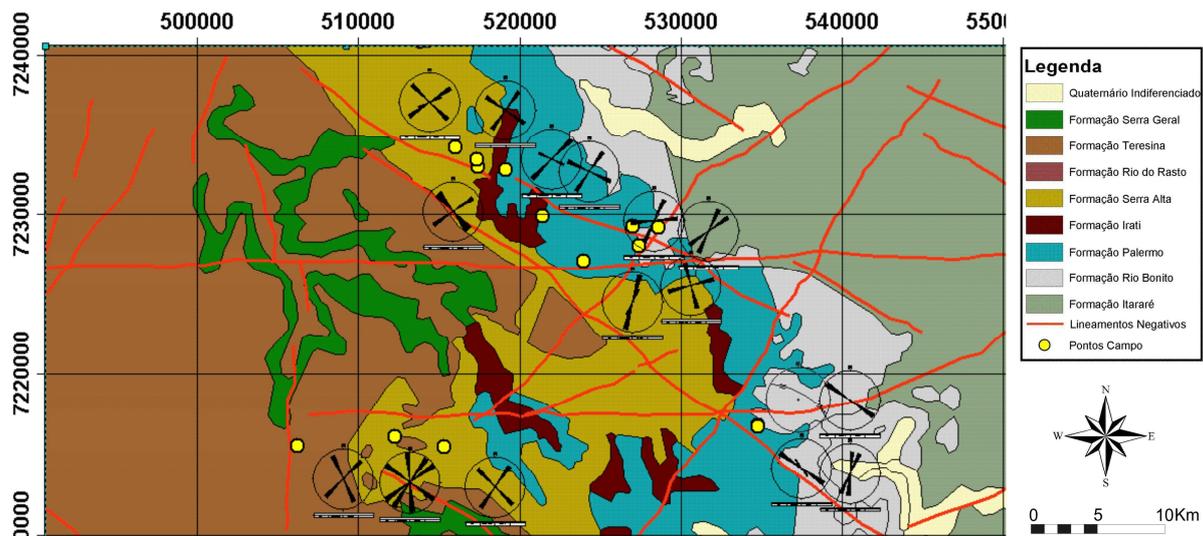


Figura 40 – Mapa geológico da região de Prudentópolis (área de semidetalhe). Lineamentos interpretados, pontos de campo e diagramas de roseta.

Para a realização do trabalho de modelagem 3D da área de detalhe, dados de campo foram obtidos de Figueira (2004), na porção nordeste da área, contribuindo para melhor entendimento da geologia estrutural do Morro do Jacaré.

Conforme observado nas imagens previamente geradas e interpretadas, os lineamentos traçados apresentam-se em campo de modo geral retilíneo e verticalizado. Ao mesmo tempo, estudos em afloramentos, mostraram que a área de detalhe apresenta-se seccionada por duas direções principais de fraturas/falhas, NE-SW e NW-SE, as quais condicionam as feições e faces do Morro do Jacaré. Estas duas direções foram verificadas por Figueira (2004), que descreveu os planos de fraturas/falhas de direção NE-SW, como sendo os mais freqüentes e os de direção NW-SE, como sendo os menos evidentes. Definindo a moda das direções, por meio de um diagrama de roseta (Figura 41), sendo estas: N50-70E e N40-60W.

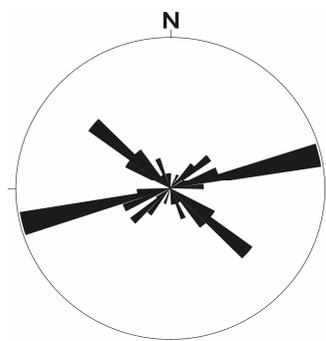


Figura 41 - Diagrama de rosetas obtido com atitudes verificadas nos afloramentos na área de detalhe. Este diagrama mostra modas entre as direções N50-70E e N40-60W (Figueira, 2004).

As megafeições encontradas na área de estudo regional foram parcialmente caracterizadas em campo. Entretanto, para muitas delas não foi possível encontrar afloramentos em suas proximidades. Na área de semidetalhe a grande maioria dos lineamentos foi detalhada, fornecendo informações sobre a cinemática e demais características das feições. No Morro do Jacaré, com a utilização de dados descritos por Figueira (2004), obteve-se um conhecimento geral da área de detalhe, possibilitando um ótimo controle de campo das estruturas, o que permitiu uma modelagem mais consistente com a realidade de cada área de estudo.

5 MODELAGEM ESTRUTURAL TRIDIMENSIONAL EM AMBIENTE PETREL

Como previsto inicialmente no projeto individual de pós-graduação, os dados obtidos durante todas as fases descritas anteriormente foram utilizados para diversas modelagens tridimensionais geológicas. Três modelos estruturais 3D foram confeccionados. Um primeiro, referente a toda área de estudo, um segundo da área de semidetalhe, denominada Prudentópolis, e um último, na porção de detalhe do Morro do Jacaré.

Seguindo a metodologia apresentada por Dhont (2006), em seu recente trabalho sobre modelagem 3D de mapas geológicos a partir de dados de superfície, procurou-se adaptar os estudos desenvolvidos nas áreas de estudo ao método descrito, com modificações experimentais incluindo novos dados geológicos.

O programa utilizado para a modelagem foi o PETREL, desenvolvido pela Schlumberger, o qual é empregado pela indústria petrolífera para a modelagem de reservatórios. Além deste, utilizou-se em ampla escala o *software* de aquisição, visualização e processamento de dados do Laser Scanner, denominado CYCLONE, desenvolvido pela empresa Leica Geosystems, o qual foi empregado na modelagem da área do Morro do Jacaré.

5.1 SEQÜÊNCIA BÁSICA DE PROCEDIMENTOS PARA MODELAGEM GEOLÓGICA NO PETREL

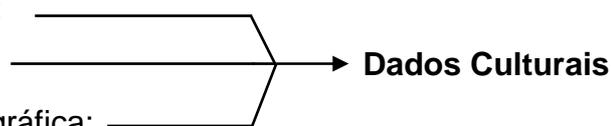
Basicamente os procedimentos para a geração de modelos em ambiente PETREL seguem a seguinte ordem:

1. Importação de dados: inserir dados geológicos, linhas sísmicas, poços reais e poços sintéticos, perfis geofísicos e geológicos de poços, dados culturais (tidos como informações referentes a imagens em geral, interpretações estruturais e dados X,Y,Z pontuais);
2. Gerar superfícies de unidades geológicas;
3. Interpretar falhas e horizontes nos diversos dados;
4. Divisão de zonas intra-reservatório, subdivisão em micro-camadas e zoneamento vertical;
5. Modelagem de fácies através de associação das zonas definidas anteriormente com poços e modelagem petrofísica, extrapolação de dados contínuos e discretos para o restante do modelo;
6. Geração de modelos.

5.2 IMPORTAÇÃO DE DADOS EM PETREL

Inicialmente todas as informações anteriores foram organizadas e preparadas. Após a organização desta base de dados, estes foram inseridos no PETREL, de forma que cada tipo de dado importado foi distribuído em pastas e subpastas específicas, criadas pelo usuário ou pré-definidas pelo programa, que consistem em:

- Imagens, fotografias aéreas e de satélite;
- Dados vetoriais;
- Interpretações;
- Superfície topográfica;
- Poços perfurados e perfilados;
- Poços virtuais construídos a partir de levantamentos geológicos;
- Sísmica de alta resolução – formato sgy.



A modelagem geológica no PETREL pode ser resumida da seguinte forma: carregar dados; gerar geometrias externas e internas; adequar escalas dos dados; visualizar e interpretar novos dados; modelar informações contínuas e discretas.

5.2.1 Dados Culturais

Conforme a nomenclatura adotada no PETREL, os dados culturais referem-se a informações vetoriais (linhas e pontos), interpretações geológicas e superfícies em geral.

A inserção dos dados vetoriais no PETREL é realizada a partir de dados no formato ASCII, ou no formato próprio de outros programas da Schlumberger. Como descrito anteriormente, dados vetoriais no formato texto ou também chamados de arquivos ASCII, são simplesmente arquivos x,y,z com ou sem cabeçalho (*header*). Desta forma os arquivos em DXF, SHP ou outro formato qualquer devem ser transformados para texto com o auxílio de programas como o Spring, ArcView, Surfer, CYCLONE, dxf2xyz ou outro *software* que faça esta conversão.

Uma vez inseridos, os dados x,y,z podem ser transformados em superfícies utilizando a função *make/edit surface*, localizada na janela do Explorer de Processos, na opção *Utilities* (Figura 42). Esta opção abre uma janela com diversos parâmetros pertinentes a geração de uma superfície. Serão atribuídas informações quanto à geometria espacial, podendo esta ser definida por um polígono pré-existente (*boundary*) ou por coordenadas UTM, assim como deve ser definido o espaçamento da malha de interpolação e o algoritmo de interpolação. Por fim é necessário acionar a tecla *apply* e/ou *OK* para gerar a superfície desejada.

Estes parâmetros são de certa forma muito semelhantes a todos os programas que geram superfícies, e, destes valores de entrada, depende muito a qualidade final da superfície gerada. Cada algoritmo interpolador exige certos valores específicos, referentes ao espaçamento da malha a ser gerada, quanto ao raio de busca, entre outras informações. Assim, é sempre necessário observar a resolução de campo para que o processo numérico não seja muito prolongado.

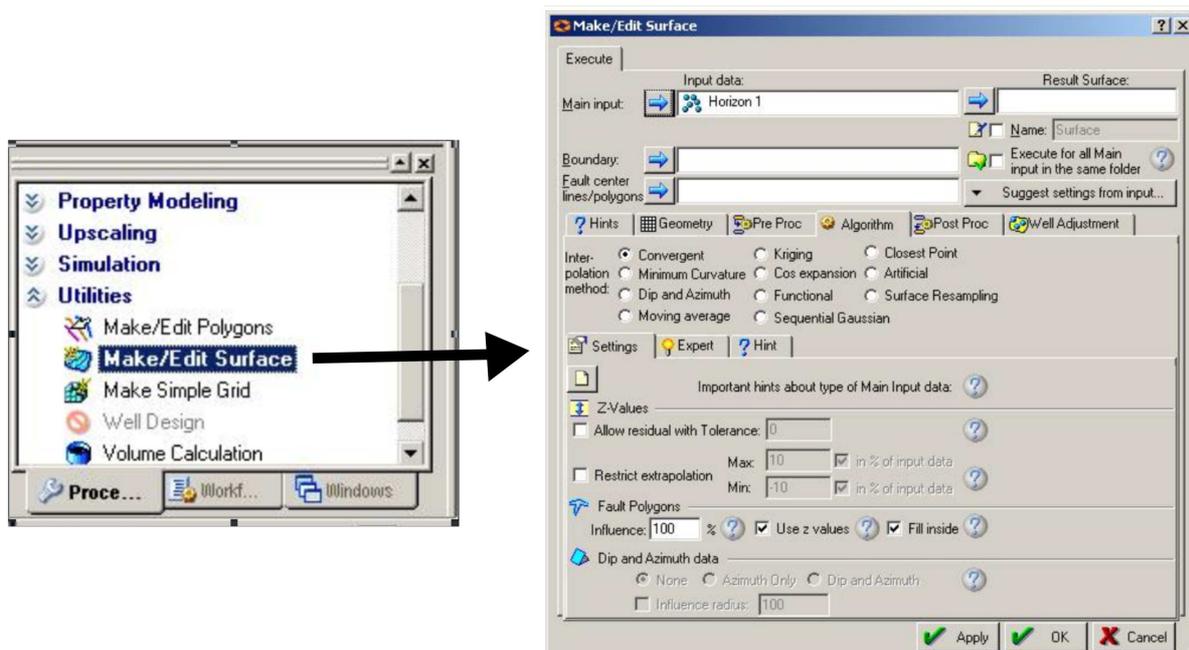


Figura 42 - Janela do *Explorer* de Processos a esquerda, demonstrando o caminho para a janela de geração de superfícies e inserção de parâmetros para a interpolação.

As superfícies geradas podem conter resultados anômalos, gerados a partir de dados errôneos ou má interpolação do programa, que são representados por picos que alteram o resultado esperado. Estes podem ser comparados a polígonos de falha com formas quaisquer, que obliterariam a real influência sobre as superfícies ou até mesmo sobre os futuros pilares que viriam a formar o esqueleto externo do modelo tridimensional. Estes e outros objetos podem ser editados interativamente sobre janelas 2D ou 3D através das ferramentas de edição manual (Figura 43).

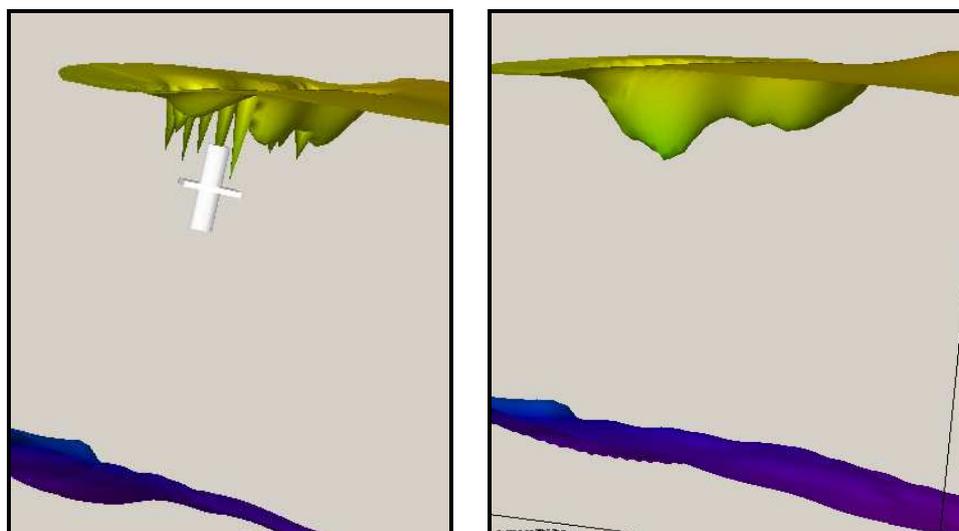


Figura 43 - Exemplo de edição de picos anômalos em superfícies.

Com as superfícies geradas e ajustadas, estas podem receber imagens de satélite, fotografias aéreas, ou qualquer outro mapa 2D, que podem ser sobrepostos a qualquer superfície para visualizar o relevo com as informações deste mapa, ou ainda atribuir cores diversas à cotas das superfícies, conforme a opção do usuário. Da mesma forma, para um dado vetorial qualquer, que possui somente informações x e y , pode-se incorporar valores de elevação obtidos de uma superfície correspondente à mesma área geográfica. Esta função é realizada a partir de um duplo clique sobre o dado vetorial. Em seguida, na caixa de opções no alto, seleciona-se a função *Operations*. Seleciona-se o item *Arithmetic Operations*, dentre as inúmeras funções matemáticas disponíveis, existe a fórmula $Z = Z + \text{surface}$, onde se deve selecionar a superfície de referência desejada e clicar sobre o botão *Execute* (Figura 44). Cada ponto do vetor irá receber um valor de Z (altitude) correspondente à altitude da superfície.

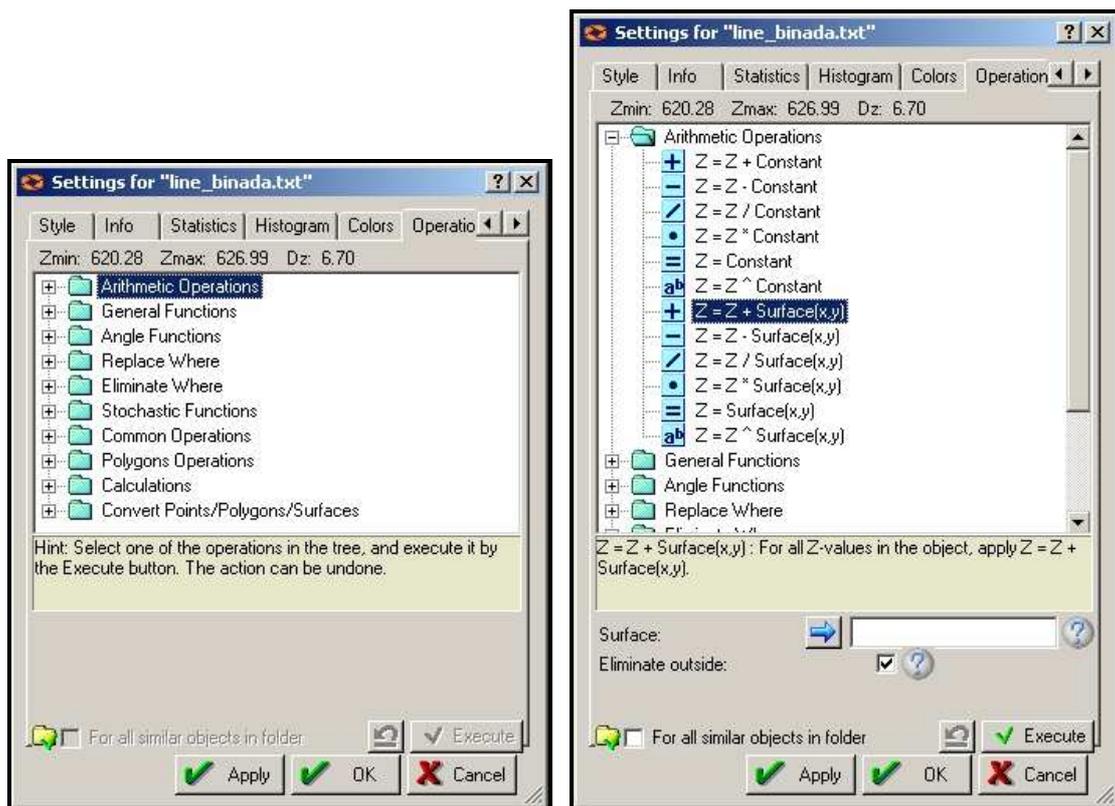


Figura 44 - Caixas de diálogos de operações matemáticas disponíveis para execução em dados vetoriais ou superfícies.

Da mesma forma que foram atribuídos valores de z em dados 2D, existem outras opções e operações matemáticas para realizar inúmeros processos, como por exemplo a transformação de linhas em pontos e vice-versa, para serem inseridas em outros programas ou na utilização em poços sintéticos.

5.2.2 Importação de imagens

A interpolação de imagens é um processo relativamente simples e bastante utilizado, quando existe a necessidade de se inserir figuras 2D no *software* de modelagem. O carregamento destes dados em PETREL permite e auxilia a visualização e interpretação de feições geológicas das áreas de estudo.

Como descrito no subitem anterior, imagens de sensores remotos, mapas geológicos, perfis de poços e até mesmo perfis geofísicos no formato de figuras, podem ser associados a superfícies, poços ou simplesmente posicionados em algum lugar do espaço. Desta forma são disponibilizadas informações no formato *raster* que podem contribuir para interpretações, correlacionando e associando novos dados a vetores previamente interpretados. Assim, de forma ágil, o banco de dados é atualizado. Entretanto, os formatos aceitos são os seguintes: bmp, .jpg, .pcx, .tiff ou .tga.

A rotina utilizada para a inserção de imagens *raster* consiste em:

1. Com o botão direito do *mouse* (B3) seleciona-se a opção *Import (on selection)* e o arquivo a ser importado;
2. Clica-se com B3 no arquivo importado e seleciona-se a opção *Settings*;
3. Em *Settings* seleciona-se a opção referente à imagem, se for um mapa ou qualquer imagem da superfície, utiliza-se *Located in world* e *Constant Z*, caso seja um perfil qualquer vertical, utiliza-se a opção *Located in world* e *Independent edges*;
4. Entra-se com as coordenadas relativas ou absolutas de cada vértice da figura, conforme a Figura 45;
5. Clica-se em *Apply* e *OK*.

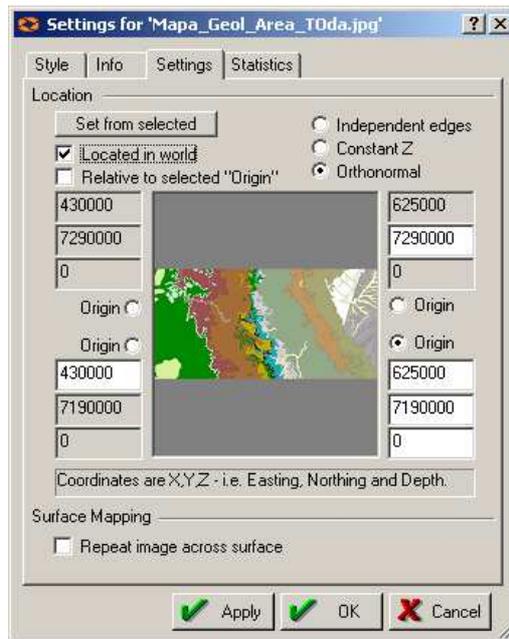


Figura 45 – Janela do procedimento de atribuição de coordenadas às imagens inseridas em PETREL.

Em seguida, para visualizar a imagem importada, deve-se acionar a mesma e clicar na opção *view all* na barra principal do programa, localizada no topo do mesmo. Por fim, tal imagem estará pronta para ser utilizada e contribuir na análise dos dados estruturais (Figura 46).

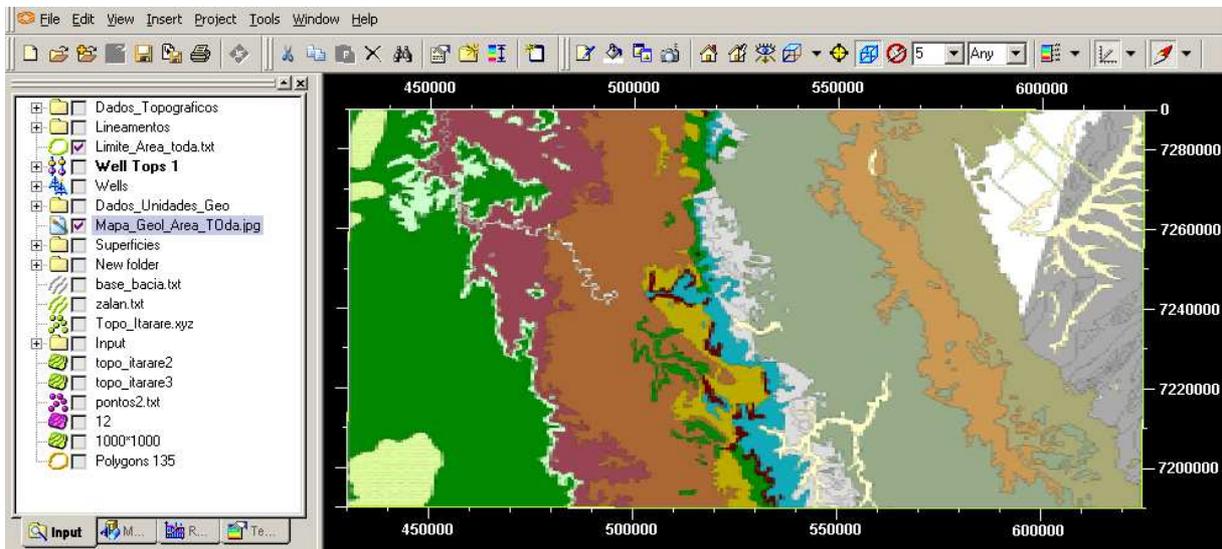


Figura 46 – Mapa geológico da área de estudo carregado em ambiente PETREL.

5.2.3 Poços Reais

No PETREL existe uma seqüência lógica de carregamento de poços. Após criar uma pasta de poços (*Well folder*), é necessário inserir, como descrito acima, um arquivo ASCII, o qual deve conter informações referentes às localizações dos poços com dados x,y,z em UTM, conhecido como *Well Heads*; também devem conter os nomes dos poços e informações gerais, como, por exemplo, profundidade total, KB (topo do poço), tipo de poço, entre outras. Poços com desvio ao longo da profundidade podem ser associados a estas informações ou, caso seja ignorada esta etapa, o poço continuará sendo vertical.

Após carregados os poços em PETREL, inicia-se a inserção e associação de dados de perfis geofísicos (*logs*) ou informações qualitativas, como topo de formações, quando disponíveis. De modo geral, os *logs* podem estar em diversos formatos, sendo o mais conhecido o formato LAS. Como de costume, o formato LAS é um arquivo de texto, com um cabeçalho que define cada coluna do arquivo. O PETREL reconhece as curvas e a qual padrão elas devem ser associadas, por exemplo: uma curva do perfil sônico reconhecida pelo programa, automaticamente será colocada na escala usual para este tipo de dado. Caso o *log* seja sintético ou fora de padrão, as informações do tipo de curva que está sendo importada devem ser selecionadas em uma lista disponível na janela de importação.

Para inserir e atribuir informações quanto à localização de topo de unidades, sejam elas litológicas ou estratigráficas, a ferramenta de *well tops* é utilizada, assim gerando-se uma pasta específica. Nesta são atribuídas informações estratigráficas para cada poço com a utilização do comando *Make/Edit Well Tops* do item *Stratigraphic Modelling*. A partir deste procedimento, deve-se criar tantos horizontes estratigráficos quantos forem necessários na pasta de *Well Tops*, sempre levando em consideração o número de unidades estratigráficas ou litológicas da área a ser modelada (Figura 47).

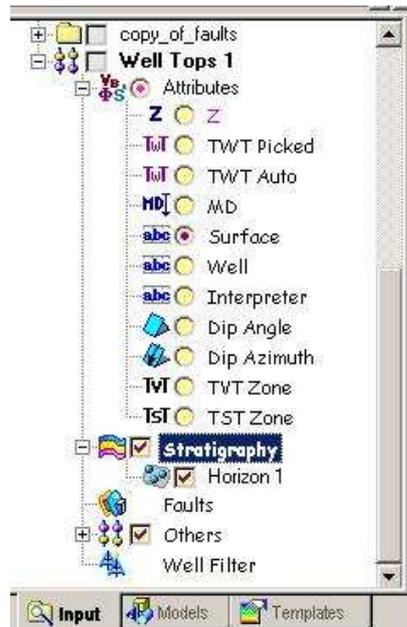


Figura 47 - Pasta *Well tops*, específica para informações qualitativas em poços com suas subdivisões, parâmetros de configuração e horizonte estratigráfico criado.

As descrições geológicas ou geofísicas qualitativas ao longo dos poços, referentes ao topo de cada unidade, também chamados de *Well Tops*, podem ser importadas em formato ASCII. Outra maneira de atribuir tais informações é criando-se uma planilha eletrônica na pasta de *Well Tops*, inserindo as descrições manualmente através da área de transferência do Windows de um arquivo Excel, ou outra planilha eletrônica qualquer (Figura 48).

	Well	Surface	X	Y	Z	MD	TWT Picked	TWT Auto	TVT
2	1-CA-1-PR	Guata	460328.00	7286824.00	-291.00	773.00			
3	1-CA-1-PR	Itarare	460328.00	7286824.00	-578.00	1060.00			
4	1-CA-1-PR	PG	460328.00	7286824.00	-1156.00	1638.00			
5	1-CA-2-PR	Rio_Rasto	457050.00	7291305.00	486.15	0.00			
6	1-CA-2-PR	Guata	457050.00	7291305.00	-344.85	831.00			
7	1-CA-2-PR	Itarare	457050.00	7291305.00	-606.85	1093.00			
8	1-CA-2-PR	PG	457050.00	7291305.00	-1371.85	1858.00			
9	1-CA-3-PR	Rio_Rasto	462326.00	7286237.00	527.50	0.00			
10	1-CA-3-PR	Guata	462326.00	7286237.00	-416.50	944.00			
11	1-CA-3-PR	Itarare	462326.00	7286237.00	-735.50	1263.00			
12	1-CA-3-PR	PG	462326.00	7286237.00	-1301.50	1829.00			
13	1-CN-2-SC	Rio_Rasto	562140.00	7103070.00	770.50	0.00			
14	1-CN-2-SC	Guata	562140.00	7103070.00	619.50	151.00			
15	1-CN-2-SC	Itarare	562140.00	7103070.00	378.50	392.00			
16	1-CN-2-SC	PG	562140.00	7103070.00	-327.50	1098.00			
17	1-CS-2-PR	Sao_Bento	404804.00	7237012.00	904.00	0.00			
18	1-CS-2-PR	Rio_Rasto	404804.00	7237012.00	-161.00	1065.00			
19	1-CS-2-PR	Guata	404804.00	7237012.00	-1278.00	2182.00			
20	1-CS-2-PR	Itarare	404804.00	7237012.00	-1696.00	2600.00			
21	1-CS-2-PR	PG	404804.00	7237012.00	-2595.00	3499.00			

Figura 48 – Planilha interna ao PETREL, demonstrando poços inseridos, seus nomes, unidades, coordenadas e topo de cada formação, em cota e profundidade.

Associado a geração dos diversos horizontes estratigráficos, são originadas automaticamente pelo PETREL zonas visíveis numa seção de um poço, qualificando e assim separando as unidades litológicas. No intervalo de um horizonte ao outro, é inserida uma zona. Esta servirá no futuro para gerar os modelos volumétricos das unidades geológicas da área estudada.

Quando necessário ou desejado, uma zona pode ser dividida em diversas sub-zonas pelo comando *Insert/Update Zone Log*, acionado ao clicar com o botão direito do *mouse* à pasta *Well Tops* (Figura 49). Desta forma pode-se subdividir uma unidade em diversos fragmentos, conforme a nomenclatura (Grupo/Formação/Membro).

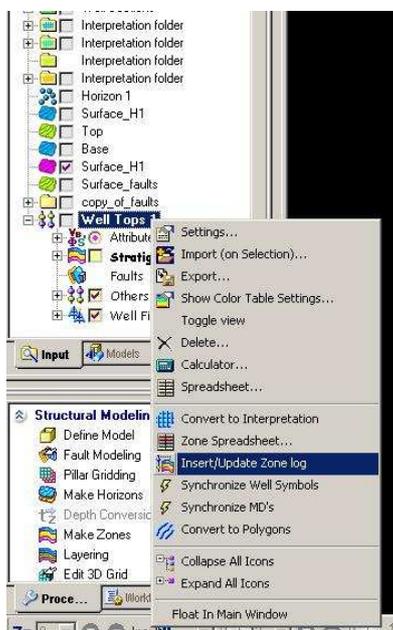


Figura 49 – Inserção e subdivisão de zonas internas as unidades estratigráficas.

Com todos os dados dos poços disponíveis carregados na pasta *Well Tops*, o passo seguinte é criar superfícies com o comando *make/edit surface*, referentes a cada horizonte estratigráfico. Deve-se sempre atribuir o espaçamento da malha, o raio de busca e escolher o método para interpolação. Desta forma, superfícies dos topos de cada unidade em profundidade são geradas a partir de dados de poços.

5.2.4 Poços virtuais

Do mesmo modo que os poços reais, os *pseudowells* ou poços virtuais devem seguir a mesma seqüência de procedimentos de importação. Como os arquivos são no formato ASCII ou estão organizados em planilhas eletrônicas, ficará fácil inserir no projeto estas informações geológicas no formato de poços.

Existe uma outra possibilidade de criar poços sintéticos a partir de um mapa geológico digitalizado. Este método foi utilizado para modelar as linhas dos contatos dos topos das unidades geológicas presentes no mapa. Desta forma os contornos das unidades observadas em mapa são honrados na modelagem 3D. Para a execução deste método, são descritos alguns passos a seguir:

1. Exportam-se as linhas dos contatos geológicos em formato dxf ou vetorial que possam ser convertidos para ASCII;
2. Converte-se as linhas de contatos para formato texto x,y,z;
3. Insere-se o arquivo no PETREL, como linhas usando o formato **General lines/points (ASCII) (*.*)**;
4. Com duplo click sobre o arquivo e nas opções no topo da janela ir em *Operations*, onde deve-se selecionar em *Arithmetic Operations* a opção **Z = Z + Surface (x,y)**; na opção na base da janela selecionar a superfície do terreno gerada anteriormente e executar. Assim atribui-se informações de altitude para as linhas dos contornos das unidades;
5. Na mesma janela, em *Polygons Operations*, seleciona-se o comando **Equal space** onde deve ser introduzido o valor desejado do espaçamento de amostragem desejado. Ex: 1000, que é igual a 1000 metros. Assim transforma-se a linha com dados x,y,z, espaçada de forma irregular, numa linha com pontos regulares;
6. Continuando na mesma janela, em *Convert Points/Polygons/Surfaces*, seleciona-se a opção **Convert to Points**. (Executar). A linha será convertida para pontos;
7. Clicar em *Apply* e *OK*;
8. Seleciona-se o arquivo gerado com o botão B3, em *Export*, com o formato **Irap classic points (ASCII) (*.*)**, para exportar em formato .txt;
9. Abre-se o arquivo exportado, agora com informações x,y,z. Os dados são então copiados em uma pasta do Excel e correlacionados com a unidade geológica correspondente (vide exemplo na Figura 50);

	A	B	C	D	E	F
1	Rio_Bonito1	Rio_bonito	541953.4	7190152	832.1318	1
2	Rio_Bonito2	Rio_bonito	542297.7	7191093	844.9334	1
3	Rio_Bonito3	Rio_bonito	542641.9	7192034	857.7349	1
4	Rio_Bonito4	Rio_bonito	542986.2	7192974	870.5365	1
5	Rio_Bonito5	Rio_bonito	543225.7	7193946	865.0556	1
6	Rio_Bonito6	Rio_bonito	542911.9	7194619	854.2839	1

Figura 50 - Edição em planilha eletrônica de poços virtuais que simulam o contato entre unidades extraídas de mapas geológicos.

10. Copiar a tabela editada e colar no mesmo arquivo de texto txt que foi gerado anteriormente e salvar o arquivo;
11. No PETREL, com o botão B3, ir em *Import (On tree)*, selecionar o arquivo de texto previamente salvo contendo a tabela em txt, e escolher o formato do arquivo como sendo um *Well Heads (*.*)*;
12. Atribuir às linhas da janela (*Import well heads*) os números referentes às informações contidas nas colunas do arquivo ASCII e clicar em *OK* (Figura 51).

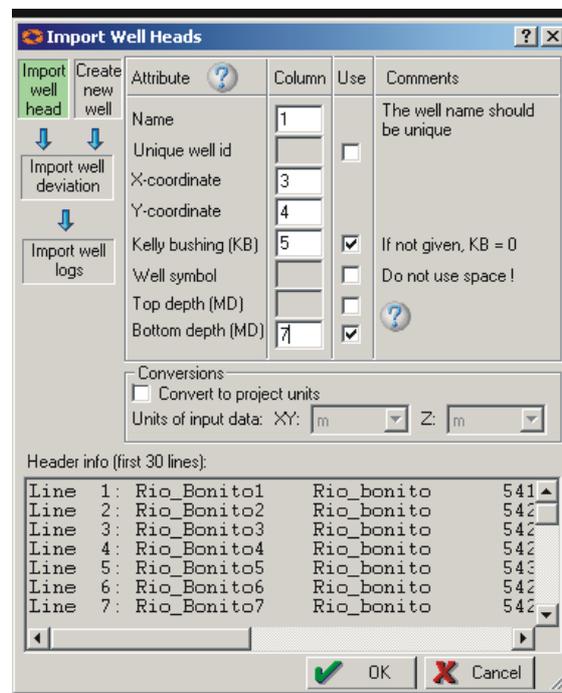


Figura 51 – Associação das colunas correspondentes do arquivo ASCII com os atributos necessários para o carregamento de poços em PETREL.

5.3 GERAÇÃO DE MODELOS SÓLIDOS VOLUMÉTRICOS NO PETREL

Conforme a seqüência lógica disponível no programa de modelagem tridimensional, a etapa seguinte para a geração de sólidos consiste em cinco passos conforme segue:

- 1) Gerar uma pasta para o modelo;
- 2) Criar cercas de fraturas ou falhas geológicas;
- 3) Gerar esqueleto do modelo;
- 4) Gerar horizontes estratigráficos;
- 5) Atribuir informações às unidades.

Ao seguir estes passos, os modelos estarão prontos para visualizações tridimensionais das diferentes feições geológicas, para análises estruturais ou para futuros ensaios de possíveis simulações de fluxo. Para uma melhor compreensão dos passos acima citados, seguem os métodos para suas aplicações.

5.3.1 Geração de pasta para modelos.

O passo mais simples e rápido para a geração dos modelos volumétricos tridimensionais consiste, basicamente, após terem sido criadas todas as superfícies e inseridos todos os dados geológicos, em selecionar o item *Define Model* no processo *Structural Modeling* (Figura 52). Este comando abrirá uma janela, onde deve-se inserir o nome desejado do sólido, criando uma pasta com o ícone idêntico ao do processo utilizado, com subdivisões onde serão carregados todos os passos seguintes.



Figura 52 – Modelo estrutural definido no item *define model*.

5.3.2 Criação de cercas de fraturas ou falhas

Com a pasta do modelo gerado, o passo seguinte engloba a etapa mais importante da modelagem estrutural. Neste processo, os lineamentos previamente inseridos e trabalhados são transformados em cercas referentes a zonas de fraturas ou falhas. As cercas são assim denominadas por comporem uma série de pilares seccionados por duas ou mais linhas, semelhantes a uma cerca.

A rotina adotada para a conversão das linhas em planos inicia-se com a seleção da função *Fault Modeling* na janela de processos, que abrirá uma barra de funções referentes à criação e edição de planos de falhas. Em seguida o procedimento consiste em transformar cada ponto da linha em pilhas verticais, que podem conter internamente dois, três ou mais pontos.

A quantidade de pontos de cada pilar, em uma cerca de falha, tem o propósito de gerar planos retilíneos (dois pontos definem uma reta), ou planos curvos (três ou mais pontos).

Após escolher a quantidade de pontos a serem inseridos em cada pilar, deve-se selecionar um lineamento previamente carregado e pressionar a função *Create Fault from Fault Polygons*. Este processo deve ser aplicado a todos lineamentos, que automaticamente criará uma fratura na pasta do modelo 3D.

Com as cercas criadas e um duplo clique sobre a função *Fault Modeling*, devem ser atribuídas às superfícies das unidades basal e de topo, de forma a projetar as fraturas até o limite do modelo a ser gerado. Em seguida, na mesma janela, a opção *Auto Connect* deve ser selecionada. Esta irá inserir um pilar de união nas intersecções de cercas de fratura ou falha. De posse de todas as cercas de fraturas ou falhas, o passo seguinte consiste em aplicar o comando *Pillar Gridding*, o qual originará o primeiro esqueleto do modelo computacional.

5.3.3 Geração do esqueleto do modelo

O *Skeleton*, assim chamado pelo PETREL, é o conjunto de três superfícies, integradas com os topos, meios e bases de todos os pilares de falhas previamente geradas. Como descrito anteriormente, o comando utilizado é o *Pillar Gridding*, onde

são indicados diversos parâmetros no momento da construção do esqueleto, entre eles a resolução (tamanho da malha), nome, tipo de interação da grade com as falhas, entre outras (Figura 53).

Além dos parâmetros utilizados na janela de geração do esqueleto, antes de executar os processos matemáticos, é necessário a geração de um limite (*boundary*). Este limite pode ser ou não integrado à falhas, e caso seja preciso deve ser desenhado com ferramenta específica sobre a janela de visualização de falhas em planta.

Durante a execução deste comando, todas as cercas das falhas serão transformadas em planos sólidos, o que não permitirá mais a sua edição.

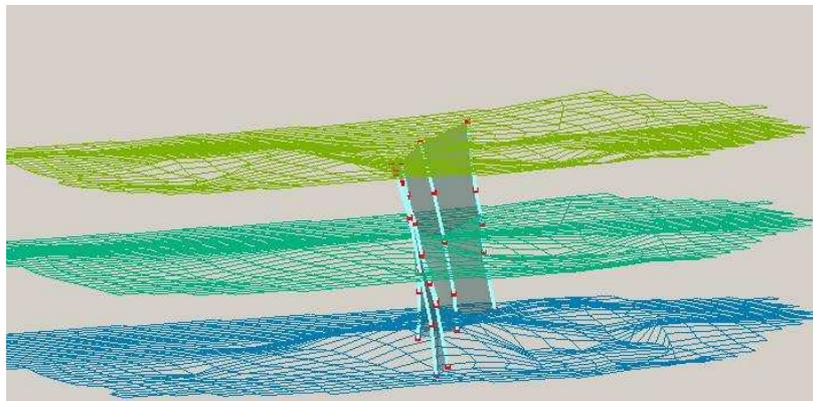


Figura 53 - Esqueleto (topo, meio e base) diretamente relacionado com as falhas interpretadas.

5.3.4 Criação de horizontes estratigráficos

Depois de inseridos todos os dados e terem sido geradas todas as superfícies, cercas de falha e esqueleto do modelo, o passo seguinte refere-se à criação dos horizontes. O comando utilizado para esta função é o *Make Horizons*, que abre uma janela onde deverão ser inseridas todas as superfícies previamente criadas, em ordem cronoestratigráfica. No mesmo quadro, deve-se indicar o estilo ou tipo de cada superfície, se a mesma é referente ao topo ou à base do modelo, erosional ou gradacional.

Aos planos de fraturas previamente criados, pode ser atribuída a movimentação, podendo ser falhas normais, ou inversas. Haja vista que nem todos

os planos apresentam movimentações, deve-se desabilitar as fraturas que não influenciarão nos horizontes e por conseqüência os modelos.

Da mesma forma que as superfícies, os horizontes criados também podem ser editados. Os comandos apresentam uma única diferença, com a seleção da opção *Edit 3D Grid* no painel de processo.

Para a edição do horizonte escolhido, deve-se selecionar na pasta do modelo o horizonte desejado. Com estes parâmetros prontos, deve-se acionar as opções *Lock Whem Moving*, *Select Horizons Nodes*, *Move Along Line Tangent Only* e utilizar a Seta *Set Select/Pick Mode (P)*. Com isso pode-se iniciar a sua edição.

Após a edição dos horizontes, deve-se selecionar novamente a opção *Make Horizons* no painel de processo. Neste, deve-se selecionar somente os horizontes a serem recalculados, preservando os parâmetros originais utilizados na geração de todos os horizontes, reduzindo o tempo de processamento.

5.3.5 Atribuição de informações às unidades

O último passo necessário para a geração dos modelos tridimensionais consiste basicamente em atribuir informações a cada unidade geológica. Esta etapa é desenvolvida através das opções internas ao item *Property Modeling*, inserida na janela de processos. Estas podem ser utilizadas na geração de alguns atributos freqüentemente utilizados na modelagem geológica, como segue:

- *Geometrical Modeling* – Existem funções pré-definidas para gerar algumas propriedades como volume total (*Bulk Volume*), profundidade, espessura acima de um contato, etc.
- *Up-scaling* – Transfere os valores das curvas de log dos poços para as células cortadas por ele.
- *Petrophysical Modeling* – Consiste basicamente em extrapolar propriedades ao longo do modelo, utilizando métodos de interpolação.

Com este último passo finalizado, os modelos lito-estruturais geológicos 3D estarão prontos para serem utilizados em interpretações ou análises.

5.4 MODELAGEM TRIDIMENSIONAL DAS ÁREAS DE ESTUDO

5.4.1 Área regional

Nesta modelagem tridimensional lito-estrutural, as informações de cunho geológico superficiais foram associadas entre si e correlacionadas com dados de subsuperfície.

A modelagem em PETREL da área regional utilizou todos os artefatos disponíveis que foram convertidos, analisados, filtrados e inseridos como dados primários no modelador, tais como: (i) pontos da superfície (aproximadamente 980.000), originados dos dados SRTM, gerando o relevo; (ii) imagens 2D de fotos aéreas, Landsat 7 ETM+ e mapas geológicos; (iii) lineamentos traçados, interpretados e refinados de forma integrada; (iv) contatos dos topos de unidades geológicas da área, no caso grupos estratigráficos foram transformados em centenas de poços sintéticos reamostrados com espaçamentos entre pontos de 500 metros; (v) um total de 51 poços reais profundos da bacia foram carregados; (vi) dados de campo, obtidos sobre os lineamentos, serviram para atribuir informações sobre as suas características e cinemática.

No processo de importação dos dados foram geradas oito superfícies. Destas, seis são os topos dos grupos (Rio Ivaí, Paraná, Itararé, Guatá, Passa Dois e São Bento), duas delimitam o topo e a base do modelo, sendo uma relativa ao relevo e outra a cópia do topo do embasamento rebatido para 2000 metros para baixo dele (Figura 54).

Devido à modelagem ter sido executada para uma área relativamente grande, optou-se em trabalhar as unidades em grupos e não em formações. Esta opção baseou-se na continuidade dos dados nos diversos poços. Outro fator utilizado para esta escolha foi a capacidade operacional do equipamento disponível. Utilizou-se um computador Duplo processado AMD, com 1,6 Ghz X 2, com um total de 2 *gigabytes* de memória RAM e placa de aceleração gráfica 3d de 128 Mb.

Ao observar os ensaios iniciais, testes e modelos teóricos, constatou-se que a escala de visualização não era adequada. Desta forma, ao observar as superfícies separadas por grupos no modelador, foi necessário adotar um exagero vertical de no

mínimo 5 vezes. Assim, foi possível obter uma melhor visualização dos elementos nos modelos.

Estas superfícies, com exceção do topo e da base do modelo foram geradas a partir de dados dos poços profundos reais, associados com informações de poços virtuais criados a partir das linhas dos contatos das unidades extraídas do mapa geológico do Paraná (DNPM, 1989). Os dados de ambos os tipos de poços foram carregados em PETREL na forma de tabelas, conforme a Figura 48.

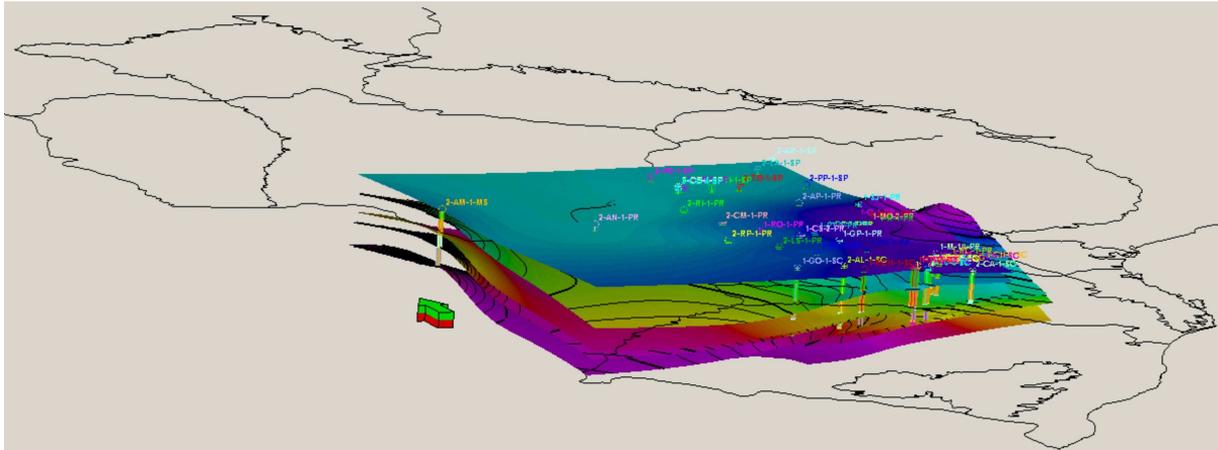


Figura 54 – Visualização em PETREL das superfícies geradas, poços e base da bacia.

Para uma melhor visualização geológica da área, foi sobreposto ao MDE, gerado em PETREL a partir dos pontos do relevo, o mapa geológico da área. A partir deste, analisou-se a acurácia dos contatos e dos poços sintéticos criados. Em seguida foi criada uma pasta para o modelo onde seriam armazenados todos os dados processados no PETREL, referentes à modelagem volumétrica. O comando utilizado para esta tarefa foi a opção *Define Model* na janela de processo *Structural Modeling* (Figura 52).

Os lineamentos foram inseridos diretamente sobre as superfícies. A estes foram atribuídos valores de z com base no relevo e extrapolados até as duas superfícies limítrofes do modelo. Desta forma os lineamentos foram transformados em cercas referentes a planos de fraturas e carregados individualmente na pasta com o nome do modelo.

Informações coletadas em campo foram utilizadas para atribuir algumas características geométricas a estas cercas. Estas estavam principalmente associadas aos mergulhos observados em campo, bem como a forma dos planos e

direções. Entretanto, nem todas as fraturas apresentavam dados complementares. Desta forma, aqueles que não possuíam informações tiveram suas cercas definidas como verticais, com geometrias retilíneas planares.

O passo seguinte abrangeu a utilização de todas as fraturas criadas, associadas a um retângulo referente à área de estudo, para a geração do esqueleto do modelo. Devido ao tamanho da área, superior a 19.000 km², optou-se por atribuir células de 1000 x 1000 metros, com preservação da direção e forma das falhas (Figura 55). Neste processo, as falhas tidas como cercas foram transformadas em planos, impossibilitando edição posterior.

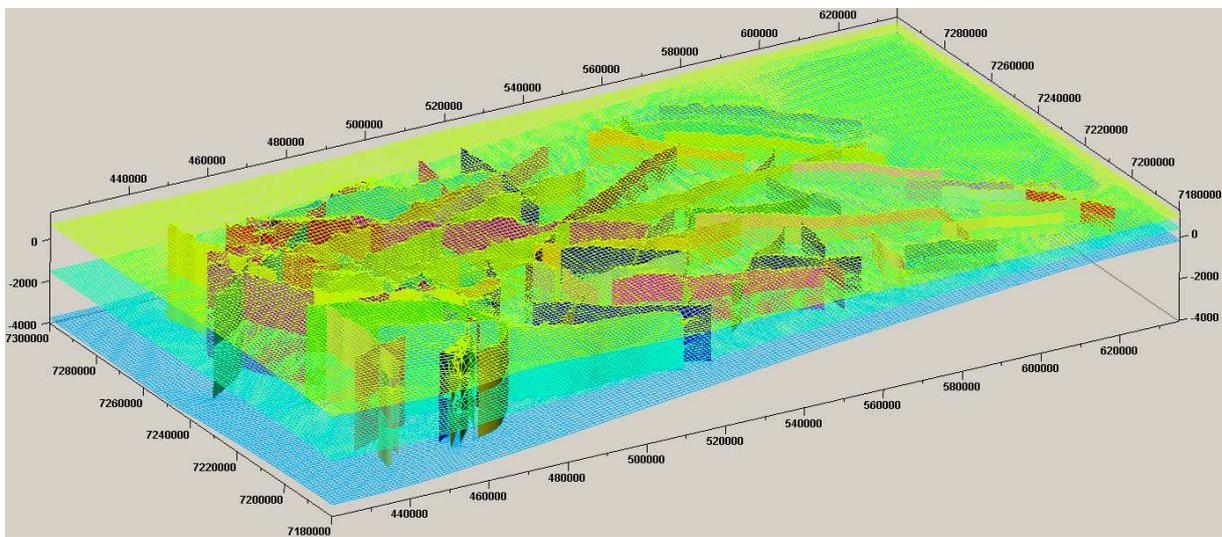


Figura 55 – Esqueleto da área de estudo regional, seccionado por planos de fraturas/falhas.

Na seqüência descrita e ofertada pelo PETREL, o passo seguinte, após a montagem do esqueleto do modelo, com seus planos de fraturas/falhas, foi a confecção de horizontes estratigráficos.

Utilizando-se todas as Informações obtidas nos mapas geofísicos, associadas ao mapa de compartimentação da área e aos dados de campo, foram atribuídas as características de cada plano de fratura. Os principais lineamentos que compuseram os mapas finais das interpretações foram atribuídos como planos principais, que viriam a controlar de forma bastante significativa a relação estrutural do modelo tridimensional (Figura 56). Esta fase da modelagem foi considerada a mais complexa e demorada, quando informações como geologia estrutural, limites, espessura de cada unidade, ordem cronológica e dados externos foram definidos e atribuídos.

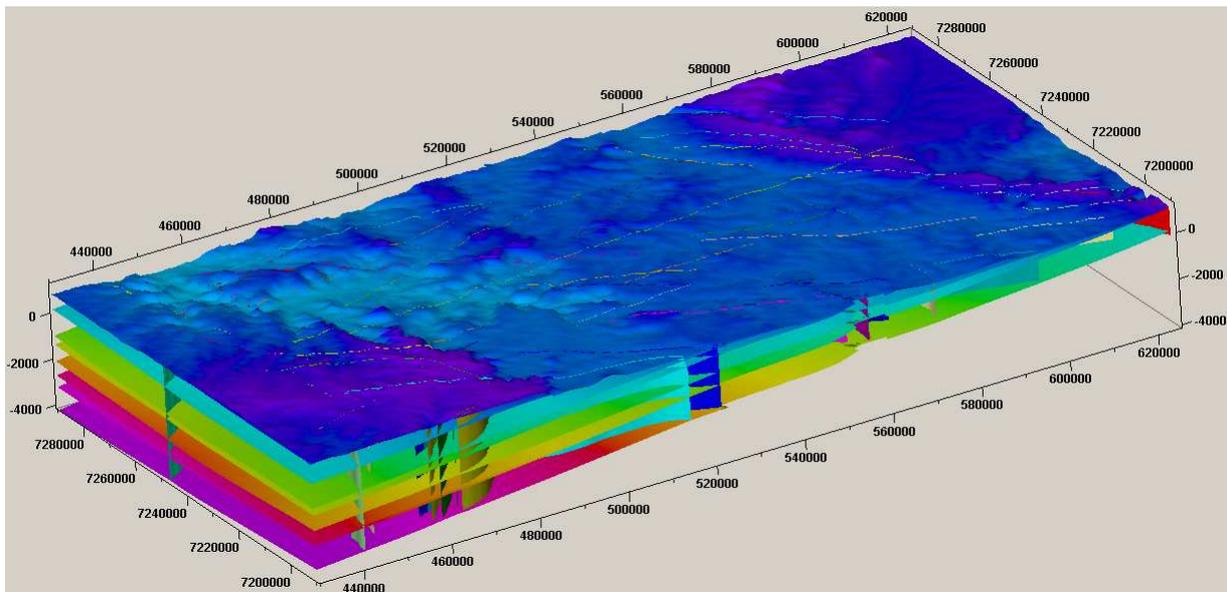


Figura 56 – Horizontes criados sobre a influência dos principais lineamentos da área.

A geração do modelo sólido para a área de estudo consistiu em preencher os intervalos vazios entre os horizontes, com blocos (*voxels*) de dimensões pré-definidas no esqueleto de 1000 x 1000 x 1000. Estes blocos utilizaram como base de cálculo o volume total de cada unidade (*Bulk Volume*). A estes intervalos preenchidos, foram atribuídas cores, diferenciando os grupos estratigráficos entre si (Figura 57).

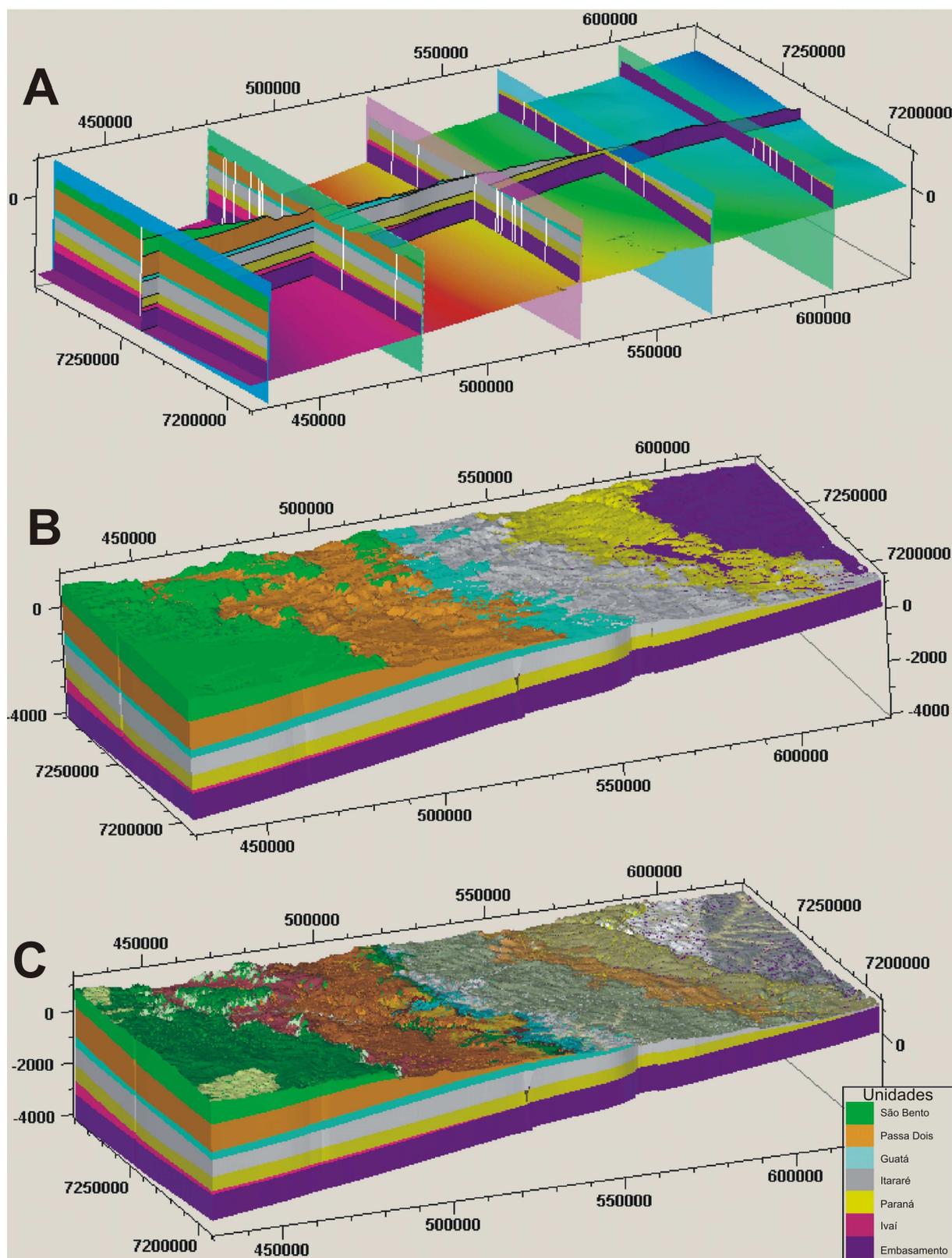


Figura 57 – Modelo tridimensional da área de estudo regional. **A)** perfis lito-estruturais gerados; **B)** Modelo sólido das unidades; **C)** Modelo volumétrico dividido em grupos, sobreposto pelo mapa geológico da área conforme Figura 8.

O modelo tridimensional gerado é composto por todas as variáveis e informações disponíveis, coletadas, interpretadas e associadas entre si, permitindo análises estruturais em diversas dimensões e posições. Poços, superfícies, fraturas, falhas, horizonte e outros dados foram integrados ao modelo, de forma a representar o arcabouço estrutural regional. Pode-se observar nos diversos perfis da Figura 57 o comportamento aparente das principais estruturas que cortam a área (traços brancos). As estruturas apresentam continuidades verticais bastante marcantes, cortando todo o pacote litológico do modelo e condicionando feições presentes. Tais lineamentos foram correlacionados com aqueles observados nos mapas magnetométricos, interpretados anteriormente.

Ensejando maior confiabilidade do modelo, destacaram-se as coincidências encontradas dos dados gerados no programa PETREL e a realidade observada em mapas. Ao observar-se a Figura 57 B e compará-la com a 57 C nas escalas de modelagem e visualização utilizadas, percebe-se uma nítida coincidência entre os modelos, corroborando a precisão do método utilizado.

5.4.2 Modelagem 3D da Área de semidetalhe (Prudentópolis)

Abrangendo cerca de 4687,5 km², a área de semidetalhe, localizada nas redondezas de Prudentópolis-PR, é composta por afloramentos de rochas devonianas até triássicas, referentes aos grupos Paraná, Itararé, Guatá e Passa Dois.

Os métodos aqui aplicados foram eminentemente os mesmo dos usados na área de estudo regional. Dados como cotas, imagens de sensores remotos, informações de poços reais e virtuais, lineamentos interpretados, bem como dados de campo, foram contemplados nesta modelagem.

Inicialmente foram geradas superfícies de contorno dos topos dos quatro grupos mencionados, além do relevo e da base do modelo. Estas foram construídas a partir de poços reais e mapas geológicos, onde se extraíram linhas dos topos das unidades que originaram poços sintéticos, reamostrados com espaçamento de 250 metros.

Em seguida foram carregados os lineamentos obtidos com base em sensores remotos, já com suas respectivas altitudes. Na etapa seguinte, uma pasta para a modelagem 3D foi criada, onde os lineamentos foram transformados em

cercas, compostas por pilares e linhas. Estas foram estendidas até os limites verticais do modelo com atribuição dos pilares de intersecção. Por ser uma área menor, obteve-se maior controle de campo, representado pela densidade de pontos ao redor da cidade de Prudentópolis (Figura 58).

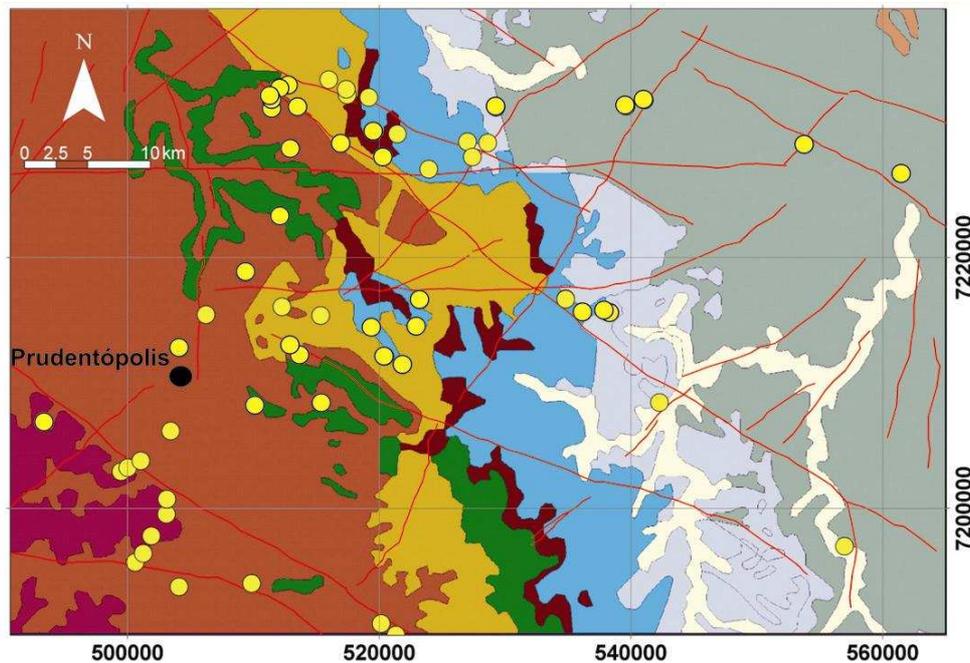


Figura 58 – Mapa geológico da área de semidetalhe com sobreposição dos lineamentos interpretados e pontos de campo.

Nesta área, optou-se em adensar a malha do esqueleto, com valores de 500 x 500 metros. Desta forma foi obtida uma melhor resolução dos dados gerados. Automaticamente todas as cercas foram transformadas em planos, que configuraram as três superfícies do esqueleto (Figura 59).

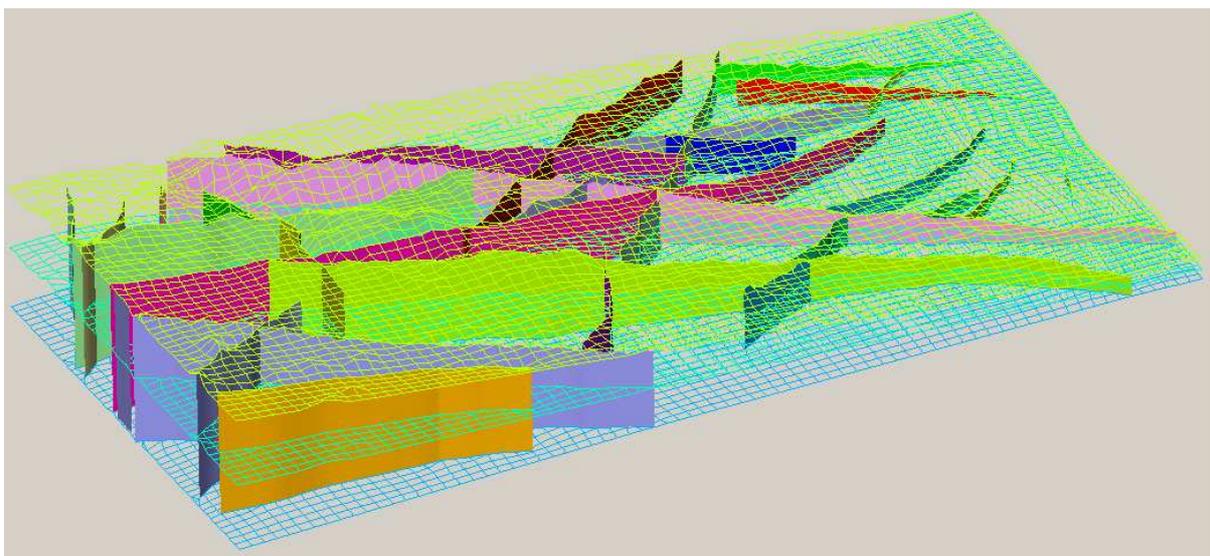


Figura 59– Esqueleto da área de Prudentópolis seccionada pelos planos de fraturas/falhas.

Em continuidade, as superfícies dos grupos foram convertidas em horizontes. Para cada horizonte foi atribuído o tipo de contato. Os horizontes dos grupos Paraná e Passa Dois foram considerados erosivos, já para os grupos Itararé e Guatá, os contatos foram gradacionais, enquanto para as superfícies limítrofes do modelo (topo e base), as altitudes foram: a cota do relevo e uma superfície a dois mil metros abaixo do topo do embasamento. Nesta conversão, os planos de fraturas/falhas incorporaram informações quanto a sua importância, conforme os dados magnéticos e de campo, além das movimentações visando representar a influência que cada plano exerceria sobre os horizontes.

A Figura 60 mostra os diagramas 3D das diferentes unidades lito-estratigráficas.

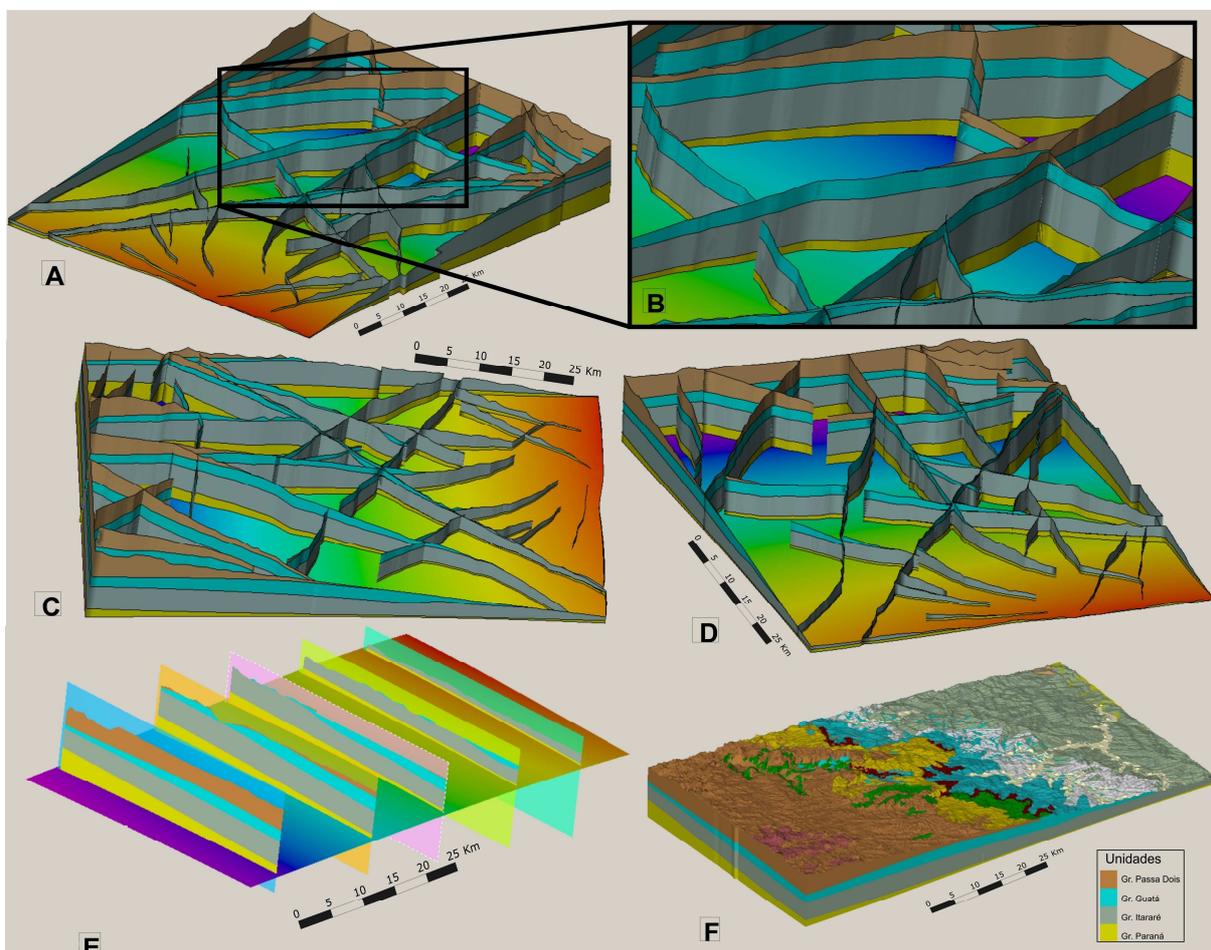


Figura 60 – Diagramas 3D da área de semidetalhe com exagero vertical de 5x. (A), (B), (C) e (D) diagramas em cerca, com prováveis falhas, (E) diagrama 3D com perfis esquemáticos, (F) bloco diagrama 3D com mapa geológico.

O preenchimento dos intervalos entre os horizontes foi procedido através de inúmeras unidades da imagem (*voxels*), automaticamente, com dimensões

aproximadas de 500 x 500 x 500 metros. A cada intervalo, foi atribuída uma cor, facilitando a identificação das unidades (Figura 61). Para esta divisão utilizou-se um método onde cada unidade foi separada pelo seu volume total, o que representou o espaçamento entre cada topo gerado anteriormente.

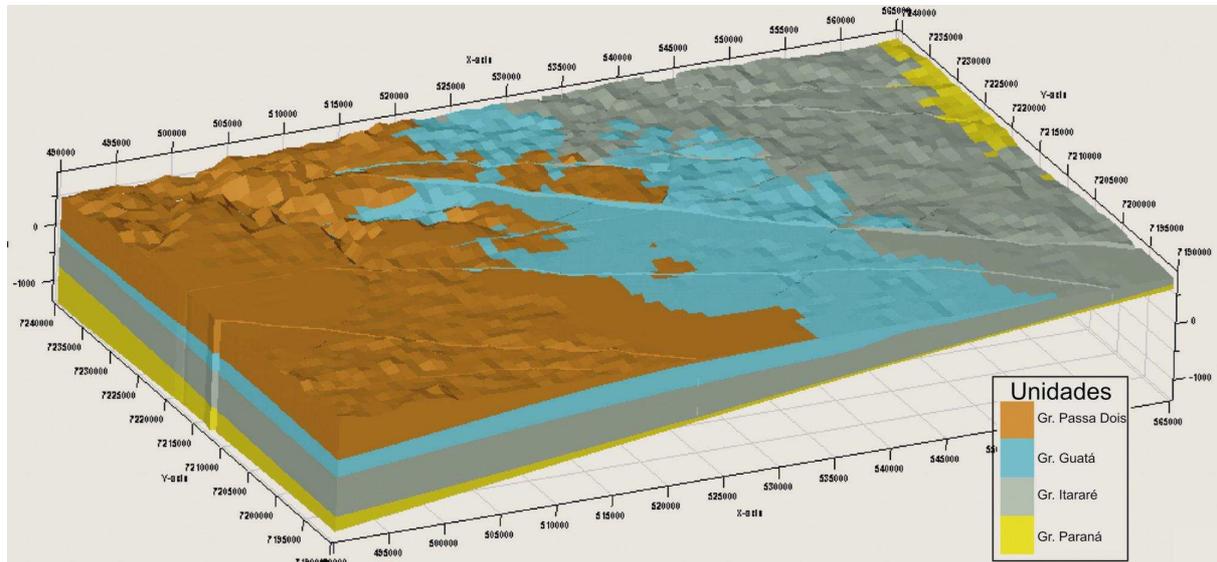


Figura 61 – Modelo tridimensional volumétrico da área de Prudentópolis.

Finalizado o modelo 3D, iniciaram-se as análises das feições estruturais e seu controle sobre as unidades, bem como sua comparação com o modelo da área regional.

Ao observar-se o modelo finalizado, composto pelas diversas informações coletadas, criadas e atribuídas para a área, constatou-se uma grande diferença entre as escalas de trabalho regional e de semidetalhe. Conforme visto anteriormente nos modelos da área regional, foi possível interpretar algumas feições, como a continuidade vertical dos lineamentos e sua presença nos perfis.

Ao se trabalhar em uma área menor, onde os dados coletados tiveram um melhor controle e o tempo de processamento foi reduzido, puderam-se realizar melhores testes, que resultaram num modelo onde as unidades geradas coincidiram com maior eficiência com as unidades presentes em mapas. Desta forma, ao visualizar o modelo numérico 3D final, constatou-se a influência que os grandes lineamentos têm sobre a coluna sedimentar da bacia, seguindo a idéia de ao se trabalhar em uma escala menor, pode-se observar a influência das feições maiores com mais facilidade.

5.4.3 Área de detalhe (Morro do Jacaré)

A área do Morro do Jacaré, composta por afloramentos de arenitos do Grupo Itararé, foi selecionada como área de detalhe para o desenvolvimento de modelos tridimensionais, pelas seguintes razões: (i) encontrar-se sobre a intersecção de duas megafeições previamente interpretadas; (ii) por apresentar características geométricas singulares; (iii) por coincidir com uma área de fácil acesso. O afloramento é caracterizado por um morro de aproximadamente 60 metros de altura em forma de cunha, onde foi possível imagear com o auxílio do Laser Scanner duas faces distintas (Norte e Sul), conforme descrito anteriormente e demonstrado na Figura 29. O afloramento apresenta inúmeras fraturas, caracterizando duas famílias, com direções médias aproximadas de N45W e N50E.

Seguindo as etapas para a modelagem tridimensional descrita nos itens 5.2 e 5.3, primeiramente foram carregados os mapas geológicos e fotos aéreas, a partir das quais foram delineados os principais lineamentos. Em seguida, após a integração dos dados do imageamento, foi realizada a importação de todos os pontos obtidos pelo Laser Scanner obtidos no afloramento.

No próximo passo, os dados foram interpretados e superfícies de contato das camadas foram traçadas conforme Figura 62, utilizando-se os programas PETREL e CYCLONE.

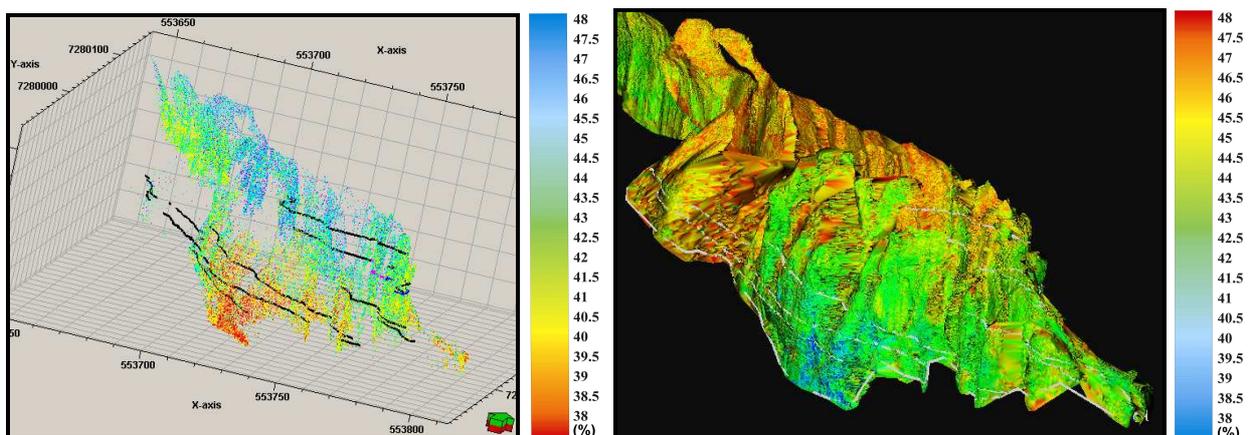


Figura 62 - A esquerda interpretação de superfícies (preto) em PETREL e a direita interpretação de superfícies (cinza) em CYCLONE. Escala em porcentagem de retorno do feixe laser em relação às cores claras (maior intensidade) versus escuras (menor intensidade).

Após o traçado dos contatos geológicos, foram geradas as superfícies, interpretadas em ambas as faces do afloramento (Figura 63).

A reconstituição aerofotogramétrica, descrita no item 4.1.5, forneceu dados que foram inseridos no programa PETREL e em seguida utilizados para a confecção de um modelo digital de elevação (MDE), disponibilizando uma imagem mais próxima ao real do afloramento e das camadas presentes (Figura 64).

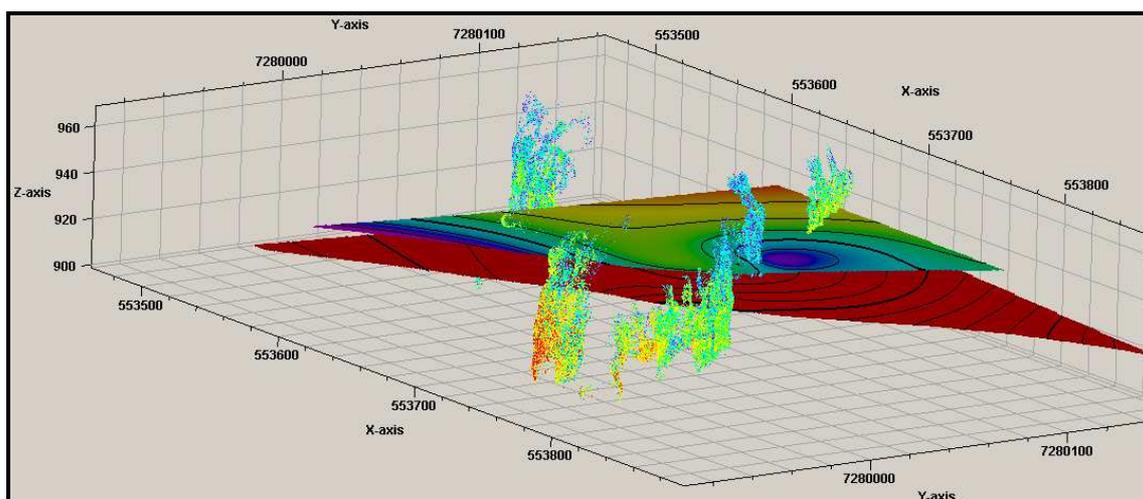


Figura 63 - Superfícies geradas a partir da interpretação sobre os dados LIDAR.

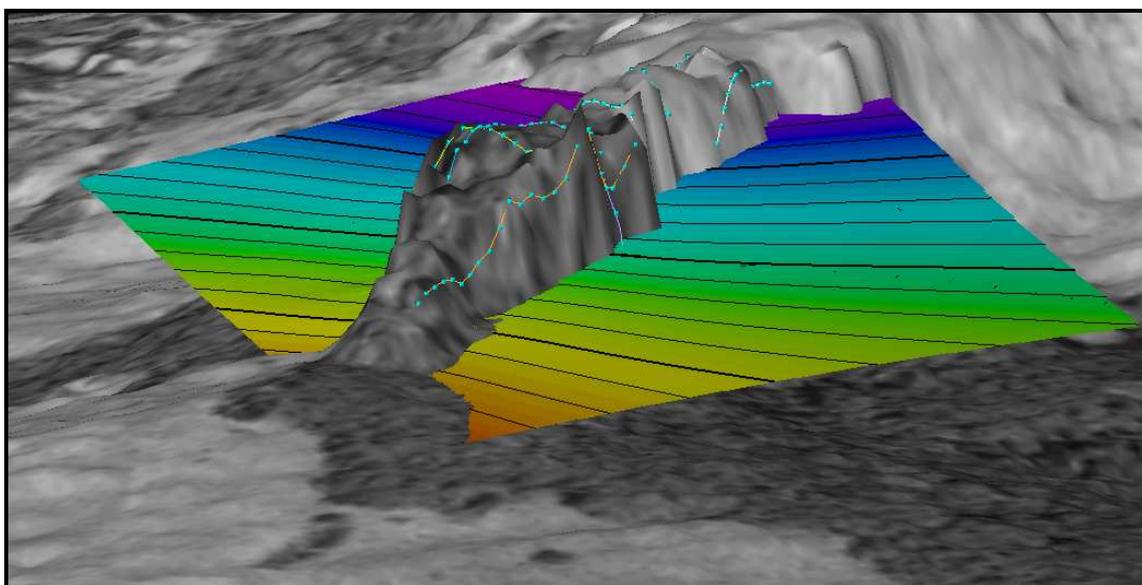


Figura 64 - MDE do Morro do Jacaré sobreposto com fotografia aérea em escala 1:10.000, com a superfície e os planos de falhas gerados no PETREL.

Em continuidade, os principais lineamentos interpretados sobre a fotografia aérea foram ajustados com base no MDE e nas nuvens de pontos previamente inseridas. Após ajustados, os lineamentos foram transformados em planos de fraturas, com mergulhos verticais a sub-verticais, conforme observado nos pontos do imageamento e prolongados à uma superfície virtual, 30 metros abaixo da base do morro (Figura 65).

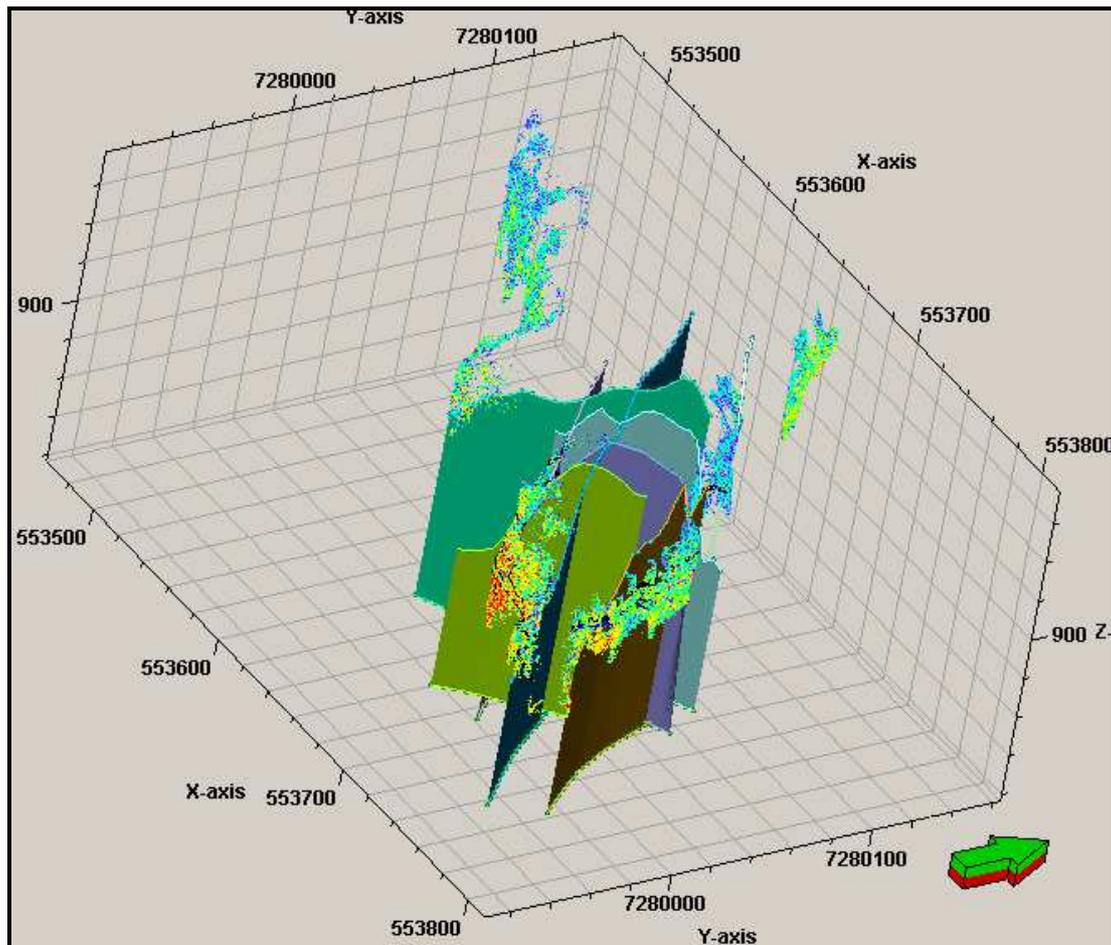


Figura 65 - Planos de fraturas extrapolados em subsuperfície com nuvens de pontos.

A partir dos planos de fraturas, iniciou-se o processo de correlação de todos os dados para a geração de um modelo tridimensional sólido da área. Desta forma, primeiro foi conferida a posição do MDE em relação às nuvens de pontos e sua associação com as superfícies (Figura 66). A Figura 67 ilustra as superfícies das camadas, cortadas pelos planos de fraturas, com o objetivo de verificar sua distribuição e possível influência destes planos nos horizontes a serem gerados.

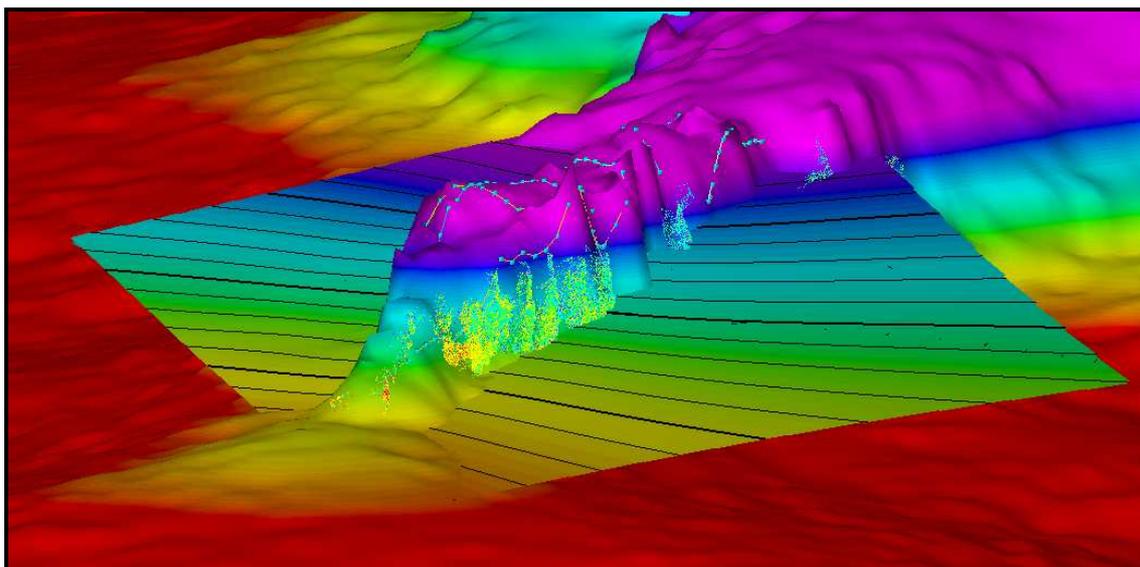


Figura 66 - MDE sobreposto às nuvens de pontos laser cortados por superfícies e planos de fraturas.

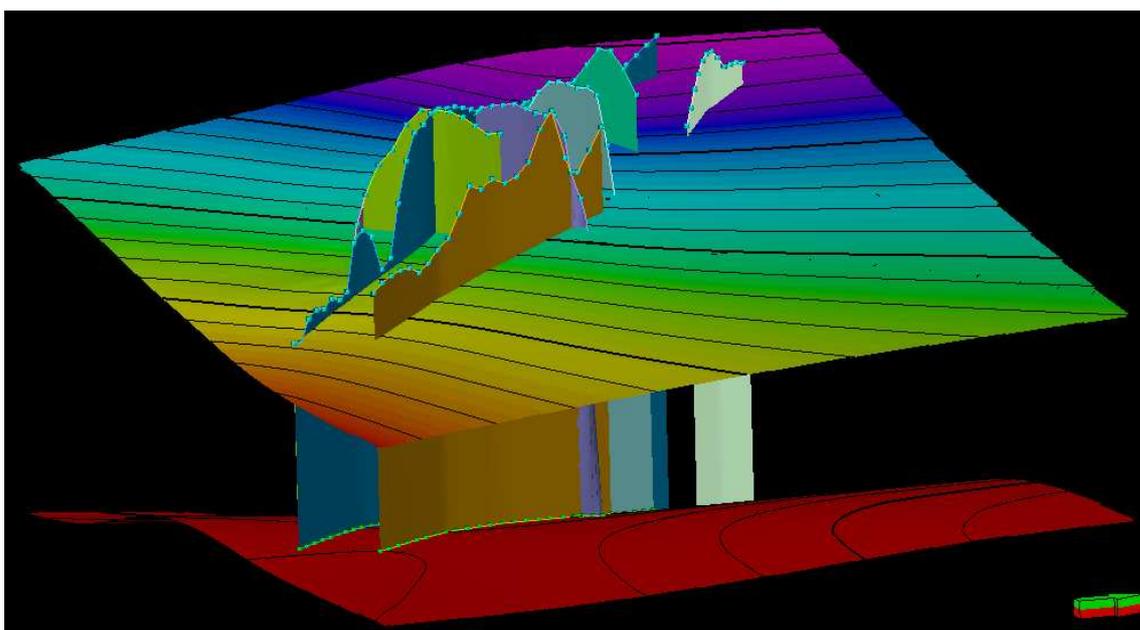


Figura 67 - Camadas interpretadas nos pontos de Laser Scanner, cortadas por planos de fraturas.

Para obter os horizontes, que consistem nas subdivisões principais de modelagem, foram definidas as superfícies e planos de fraturas que seriam utilizados. Por fim, com um tamanho de célula definido de 1x1x1 metro, gerou-se o modelo sólido tridimensional, permitindo uma visualização geral do Morro do Jacaré sob qualquer ângulo desejado, com a divisão de três unidades, referentes aos contatos interpretados anteriormente (Figura 68).

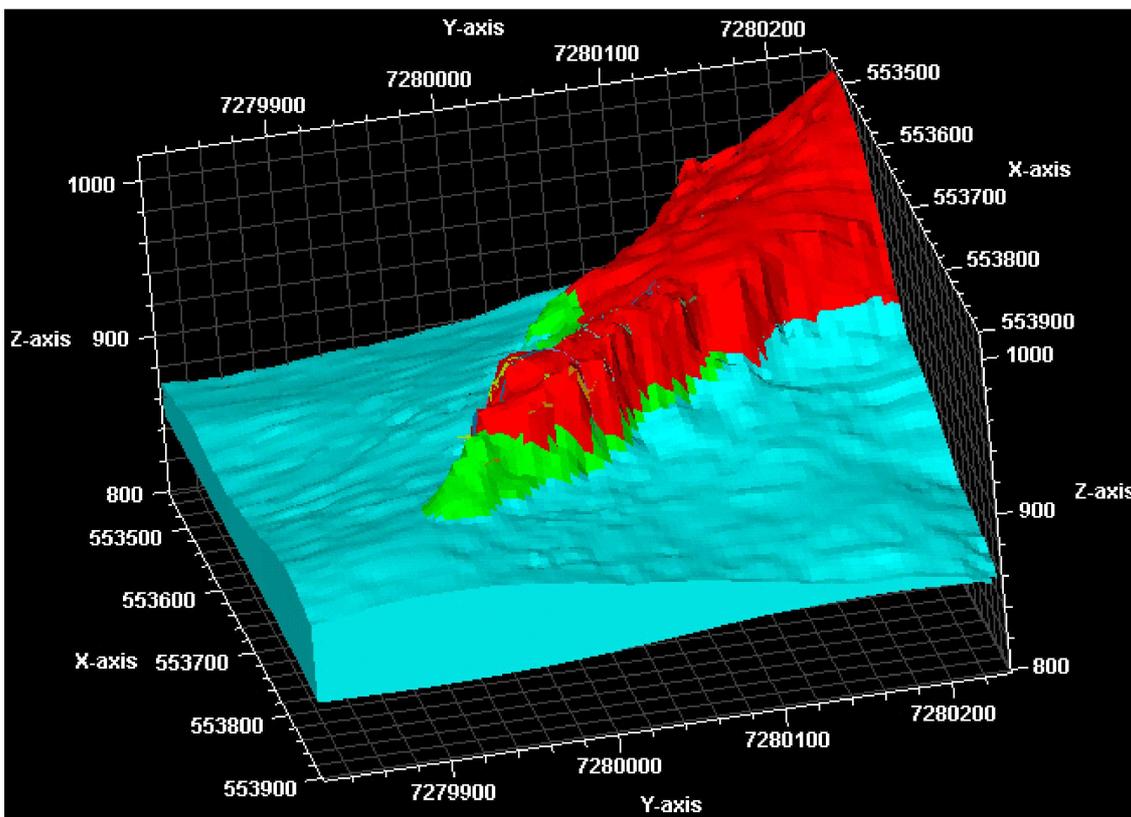


Figura 68 - Modelo volumétrico 3D da área do Morro do Jacaré.

Com o modelo numérico tridimensional gerado, foram realizadas algumas interpretações e comparações entre as estruturas da área com as demais feições presentes nas outras áreas (regional e semidetalhe).

Inicialmente, devido ao grau de detalhe do trabalho foi possível observar inúmeras fraturas, as quais tiveram de ser filtradas utilizando-se um critério de espaçamento lateral entre elas de 50 metros, assim eliminando as fraturas intermediárias para fins de modelagens. Estas foram correlacionadas com os lineamentos interpretados em fotografias aéreas e refinados com os dados do Laser Scanner. Devido às dimensões reduzidas da área, conseguiu-se diferenciar unidades geológicas mais detalhadas como camadas e fraturas, as quais puderam ser definidas com melhor precisão, apresentando maior confiabilidade do modelo para a área de detalhe.

6 DISCUSSÕES

Inserida no terceiro e segundo planaltos paranaenses, a área de estudo regional, localizada na porção centro-leste do estado, abrange uma seqüência de rochas aflorantes de idades devonianas até cretáceas da Bacia do Paraná. É seccionada pelos lineamentos de direção NW-SE: Zona de Falha Cândido de Abreu / Campo Mourão, Lineamento do Rio Piquiri e Falha do Rio Alonzo, e de direção NE-SW: Zona de Falha de Taxaquara, e Falha de Jacutinga. Associados ao Arco de Ponta Grossa, na porção norte da área, ocorrem diversos diques de direção NW-SE, ressaltando ainda, lineamentos positivos. Internamente à área regional foram escolhidas duas áreas de estudo, denominadas de semidetalhe e de detalhe, situadas respectivamente nas proximidades da cidade de Prudentópolis-PR e de Tibagi-PR.

Na confecção do presente trabalho foram empregados diferentes métodos de levantamento e análise de dados. A utilização de uma análise estrutural em multi-escala, iniciou-se com estudos regionais através de sensores remotos com baixa resolução, prosseguindo com a aquisição e análise de imagens mais refinadas e finalizando com levantamentos de detalhe em escala de afloramento. Tais informações foram aplicadas à modelagem 3D, análise estrutural e confecção de um arcabouço passível de aplicação na forma de auxiliar ensaios de simulação de fluxo.

Haja vista a área de estudo regional possuir dimensões relativamente grandes, como primeira abordagem utilizou-se sensores remotos de resolução 90 x 90 metros (SRTM). Deste modo, informações estruturais regionais foram obtidas. Objetivando refinar e classificar os principais lineamentos, foram empregadas imagens Landsat. A partir da visualização utilizando duas composições de bandas, RGB 854 e 543, as quais se demonstraram como as melhores para ressaltar feições estruturais, criou-se uma série de fragmentos de linhas muitas vezes orientados consecutivamente. Desta forma definiu-se uma série de feições lineares, predominando duas direções principais, NW-SE e NE-SW, e outras secundárias (E-W e N-S). Ensejando a confecção de modelos tridimensionais estruturais da área, os diversos fragmentos gerados foram interpretados, unindo-os e disponibilizando o arcabouço estrutural geral da área.

Como suporte aos estudos realizados, mapas geofísicos magnetométricos foram confeccionados para a área. Nestes, obteve-se informações quanto à continuidade em profundidade dos lineamentos, bem como a influência que apresentavam no arcabouço estrutural. A correlação entre os lineamentos observados em SRTM/LandSat e os magnéticos, resultaram em valiosas informações, que foram inseridas no programa de modelagem. Tais lineamentos indicariam de um modo geral, o grau de influência que cada um deles exerceria sobre a área de estudo e o quanto afetariam o arcabouço do modelo.

A realização de trabalhos de campo foi de suma importância para o refinamento das modelagens. Procurou-se coletar informações referentes às estruturas, seus comportamentos, geometria e cinemática, tendendo sempre a localizar pontos próximos dos grandes lineamentos previamente identificados.

Visando uma compartimentação estrutural da área, mapas de contorno do topo das unidades foram gerados. A união de todos, após ajustes de posicionamento, possibilitou a confecção de um mapa de contorno único, denominado horizonte fantasma. Os lineamentos interpretados nos sensores remotos foram sobrepostos e integrados, definindo o arranjo estrutural como um padrão poligonal de estruturas tectônicas. Assim, os principais lineamentos que caracterizaram a compartimentação da área receberam, no PETREL, atributos que permitiram exercer maior influência nos modelos do que os lineamentos internos.

A confecção dos modelos tridimensionais lito-estruturais, desenvolvidos em PETREL seguiram a mesma proposta inicial de trabalho em multi-escala. Três modelos foram gerados, um referente a área regional e dois internos a estas (área de semidetalhe e detalhe) em porções variadas. Na modelagem foram utilizados todos os dados disponibilizados nas etapas anteriores, acrescidos dos dados de imageamento 3D, obtidos por uma varredura realizada com o Laser Scanner.

O emprego da ferramenta (Laser Scanner) em geologia é considerado uma forma inovadora para obtenção de dados de afloramentos. O método e dados apresentaram-se com um potencial favorável para a observação e análise de dados de afloramentos.

No decorrer do desenvolvimento dos modelos 3D, foram constatados aspectos limitantes e outros favoráveis, que possibilitaram a confecção de modelos diversos. Apesar da existência de informações geológicas bastante consistentes, o modelo tridimensional gerado para a área regional não apresentou resultados satisfatórios visíveis. Como fatores limitantes, destacaram-se dificuldades técnicas computacionais, associadas à grande área de estudo, com 19.000 km². Em decorrência disto a resolução dos modelos foi prejudicada, dificultando as visualizações e possíveis análises.

Ressalta-se também a influência dos lineamentos sobre as unidades estratigráficas. Deslocamentos muitas vezes métricos atribuídos aos planos de falhas não foram observados. Somente com um ensaio hipotético, extrapolando valores da ordem de centenas de metros, as unidades apresentaram deslocamentos.

Constatou-se que os métodos empregados na geração de horizontes limítrofes entre camadas, a partir de dados de poços profundos e mapas geológicos, foram eficientes. Quanto à inserção e utilização no modelador tridimensional das informações adquiridas e interpretadas sobre os sensores remotos e dados de campo, verificou-se a eficácia do método aplicado, destacando-se a correlação entre todas as informações sobre as estruturas.

A modelagem 3D efetuada para a área de Prudentópolis apresentou resultados bastante satisfatórios, principalmente devido à possibilidade de incremento na malha de processamento. Aplicando-se o mesmo método empregado na área regional, em todos os fatores, estratigráficos e estruturais, associado a uma menor área de trabalho pode-se construir modelos bastante aprimorados. As feições estruturais visíveis nos blocos diagramas tridimensionais demonstraram deslocamentos sutis, referentes aos dados observados em campo, o que possibilitou uma melhor visualização das características estruturais da área.

A área de detalhe do Morro do Jacaré, que corresponde à aproximadamente 180.000 m², apresentou resultados adequados à escala da área e ao método empregado. Considerando o estudo de detalhe nesta área, onde os dados de poços profundos não puderam ser aplicados, houve uma adaptação do método de estudo em relação ao utilizado nas áreas anteriores. Para compensar esta falta, a utilização do Laser Scanner, como ferramenta inovadora na modelagem

tridimensional geológica de afloramentos, disponibilizou informações métricas a centimétricas das principais feições estruturais da área e de horizontes. O controle de campo, associado aos diversos dados obtidos pelo Laser Scanner, representou facilmente características estruturais tectônicas bem como feições estratigráficas no modelo gerado. A projeção destas informações estruturais para subsuperfície permitiu inferir a disposição tridimensional de heterogeneidades tabulares, representadas pelas camadas sedimentares seccionados por falhas.

7 CONCLUSÕES

A utilização de uma análise estrutural em multi-escala, iniciada com estudos regionais através de sensores remotos com baixa resolução, seguindo para imagens mais refinadas e levantamentos de detalhe em escala de afloramento, possibilitou a confecção de modelos numéricos geológicos 3D, onde pôde-se concluir:

- Os dados SRTM apresentam-se de boa aplicação para o reconhecimento de informações estruturais regionais.

- As Imagens Landsat 7 ETM+, nas composições de bandas RGB 854 e 543, destacaram-se por permitir refinar os lineamentos e possibilitaram uma conclusão sobre as direções estruturais da área, sendo duas direções principais NW-SE e NE-SW e outras secundárias (E-W e N-S).

- A correlação entre os lineamentos presentes em superfície e suas possíveis continuidades em profundidade foi possível a partir da interpretação de mapas magnetométricos continuados a uma altitude de 5000m, caracterizando as possíveis influências que os lineamentos apresentam no arcabouço geológico da área.

- A partir reconstituição de um horizonte médio à área de estudo (horizonte fantasma) possibilitou uma compartimentação estrutural da área, definindo um arranjo estrutural poligonal.

- A coleta de dados de campo, nas proximidades dos lineamentos, possibilitou a disponibilização de informações como geometria e cinemática, as quais foram inseridas na modelagem.

- O emprego da ferramenta (Laser Scanner) apresentou potencial para a observação e análise de dados de afloramentos em laboratório. Possibilitando

refinar, interpretar e correlacionar informações quanto à geometria de elementos tais como fraturas, falhas e feições sedimentares, fornecendo diversas escalas e ângulos para as suas visualizações.

- Em relação às modelagens lito-estruturais 3D no PETREL, pôde-se observar nos diversos modelos, a existência de uma repetição do registro geológico em termos de distribuição geométrica de falhas e camadas.

- Apesar da existência de informações geológicas consistentes, o modelo tridimensional gerado para a área regional foi limitado, devido à dimensão de estudo ser compreendida num espaço de 19.000 km².

- Para a porção de semidetalhe, os resultados foram bastante satisfatórios, devido o incremento na malha do processamento. Por ser uma área menor puderam-se confeccionar modelos onde as feições estruturais apresentaram deslocamentos sutis.

- Com aproximadamente 0,18 km², a área de detalhe disponibilizou informações métricas a centimétricas das principais feições estruturais e estratigráficas. A associação de dados de campo com os obtidos em escritório originou um modelo representativo das características internas à porção estuda.

- A modelagem numérica tridimensional apresenta-se como uma ferramenta de suma importância em diversas áreas da geologia. Os métodos aplicados para o desenvolvimento deste trabalho demonstraram-se eficientes nos quesitos propostos inicialmente. A modelagem 3D a partir de informações observadas em sensores remotos, dados de campo e mapas geológicos, para a representação de feições estruturais marcantes em áreas com pouca quantidade de dados de subsuperfície, mostrou-se eficaz na caracterização destas áreas.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Akhir, J. M., & Abdullah, I. 1997. Geological applications of LANDSAT thematic mapper imagery: mapping and analysis of lineaments in NW Peninsula Malaysia; **ACRS - Asian Conference on Remote Sensing**.
- Artur, P. C. 1998. Paleolineamentos na Bacia do Paraná: Favorabilidade para acumulação de petróleo. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 202 p.
- Artur, P. C. & Soares P.C. 2002. Paleoestruturas e Petróleo na Bacia do Paraná, Brasil, *Revista Brasileira de Geociências*, **32**(4):433-448.
- Assine, M. L., Soares, P. C. e Milani, E. J. 1994. Seqüências tectono-sedimentares mesopaleozóicas da Bacia do Paraná, Sul do Brasil, *Revista Brasileira de Geociências*, **24**(2):77-89.
- De Freitas, R. C. 2005. Análise Estrutural MultiTemática do Sistema Petrolífero Iratí-Rio Bonito, Bacia do Paraná. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 113 p.
- Debeglia, N., Marlette, G., Perin, J., Truffert, C., Ledru, P. e Tourlière, B. 2005. Semiautomated structural analysis of high resolution magnetic and gamma-ray spectrometry airborne surveys, *Journal of Applied Geophysics* **58**:13-28.
- Dalmolin, Q., Santos, D. R. 2004. Sistema LaserScanner: conceitos e princípios de funcionamento. UFPR. Curitiba. (3ª edição). 96 pp.
- Dhont, D., Luxey, P. e Chorowicz, J. 2006. 3-D modeling of geologic maps from surface data. *AAPG Bulletin*, **89**(11):1465–1474.
- DNPM; MINEROPAR. 1989. Mapa Geológico do Estado do Paraná. 1 mapa geológico, escala 1:650.000.
- Fedi, M. & Florio, G. 2001. Detection of potential fields source boundaries by enhanced horizontal derivative method. *Geophysical Prospecting*, **49**:40-58.
- Ferreira, F. J. F. 1982a. Integração de Dados Aeromagnéticos e Geológicos: Configuração e Evolução Tectônica do Arco de Ponta Grossa. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, 170 p.

- Ferreira, F. J. F. 1982b. Alinhamentos Estruturais – Magnéticos da Região Centro-Oriental da Bacia do Paraná – Reavaliação da Potencialidade e Prospectividade em Hidrocarbonetos. Consórcio CESP-IPT, p. 144-166.
- Ferreira, F. J. F. (em preparação). Métodos de realce de anomalias de campos potencias e sua aplicação na cartografia geofísica-estrutural.
- Figueira, I. F. R. 2004. Caracterização estrutural – estratigráfica para seleção de alvos de reservatórios análogos no sistema petrolífero Ponta Grossa – Itararé na Bacia do Paraná. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 105 p.
- França, A. B. & Potter, P. E. 1988. Estratigrafia, Ambiente Depositional e Análise de Reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). Boletim de Geociência da Petrobrás, Petrobrás, **2(4)**:147-191.
- IMAGE (*Imageamento 3D e arquitetura de elementos essenciais de sistemas petrolíferos*) 2004-2006. UFPR-FINEP-PETROBRAS, Rostirolla, S. P., coord.
- Maack, R. 1968. Geografia Física do Estado do Paraná. Badespan/UFPR/IBPT, Curitiba, 350pp.
- Madani, A. A. 2001. Selection of the optimum LANDSAT TM bands for automatic lineaments extraction, Wadi Natash área, South Eastern Desert, Egypt. **ACRS - Asian Conference on Remote Sensing.**
- Mapa rodoviário do Paraná; DNER. 2001. Disponível em: <http://www.estradas.com.br>. Acessado em fevereiro de 2005.
- Milani, E. J., Kinoshita, E. M., De Araújo, L. M, e Cunha, P. R. C. 1990. Bacia do Paraná: Possibilidades Petrolíferas da Calha Central. Boletim de Geociência da Petrobrás, Petrobrás, **4(1)**:21-34.
- Milani, E. J., França, A. B. e Schneider, R. L. 1994 Bacia do Paraná. Boletim de Geociência da Petrobrás, Petrobrás, **8(1)**:69-82.
- Milani E.J. & Catto E. 1998. Petroleum Geology of the Paraná Basin, Brazil. AAPG International Conference & Exhibition, p. 442-443.
- Milani, E. J. & Thomaz Filho, A. 2000. Sedimentary Basins of South America. In: U.G. Cordani; E.J. Milani; A. Thomaz Filho; D.A. Campos. *Tectonic Evolution of South America*, Edição Especial do 31st International Geological Congress, p: 389-449.

- Milani, E. J. 2004 – COMENTÁRIOS SOBRE A ORIGEM E A EVOLUÇÃO TECTÔNICA DA BACIA DO PARANÁ. Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução e Obra de Fernando Marques de Almeida, pp.: 265-279.
- Miller, H. G. & Singh, V. 1994a. Semiquantitative techniques for the identification and removal of directional trends in potential field data. *Journal of Applied Geophysics* **32**(1):199-211.
- Miller, H. G. & Singh, V. 1994b. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, **32**(1):213-217.
- Mitishita, E. A. 1986. Detecção de erros grosseiros em pontos de controle planialtimétricos para aerotriangulação. *Revista Brasileira de Cartografia*, **48**(1):27-35.
- MODRES (*Modelagem de Potenciais Reservatórios Fraturados em Superfície para auxílio exploratório em subsuperfície*). 2002-2004. UFPR-FINEP-PETROBRAS, Rostirolla, S. P., coord.
- PAULIPETRO, 1981. Relatório de Atividades 1979/1981, 59 pp.
- Pitas, I. 2000. *Digital Image Processing Algorithms and Applications*. John Wiley & Sons. 436pp
- Portela Filho, C. V., Ferreira F. J. F., Rosa Filho E. F., Buchmann Filho A. C. e Rostirolla S. P. 2002. Estudo preliminar da conexão entre os aquíferos Serra Geral e Guarani com base em dados aeromagnetométricos e hidroquímicos. ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Florianópolis, CD-ROM.
- Prefeitura Municipal de Prudentópolis-PR; Atrativos Turísticos, Saltos e Cachoeiras 2006. Disponível em: <http://www.prudentopolis.pr.gov.br>. Acessado em maio de 2006.
- Rostirolla, S. P., Assine M. L., Fernandes L. A. e Artur P. C. 2000. Reativação de Paleolineamentos durante a Evolução da Bacia do Paraná – O Exemplo do Alto Estrutural de Quatiguá. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**(4):639-648.
- Rostirolla, S. P., Appi, C. J., Vesely, F. F., Trzaskos-Lipski, B., Mancini, F. e Kraft, R. P. 2003. Análise Preliminar das Rotas de Migração de Gás no Sistema Petrolífero Ponta Grossa - Itararé (!) Na Bacia do Paraná. Búzios – Brasil. *In IX Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, 1, Anais, p. 1-5.
- SOARES, P. C. 1973. O Mesozóico Gonduânico no Estado de São Paulo. Tese de Doutorado, Departamento de Geologia e Mineralogia da Faculdade de

- Filosofia, Ciências e Letras, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Rio Claro, 152 p.
- Soares, P. C., Barcellos, P. E. e Csordas, S. M. 1982. Análise, interpretação e integração de lineamentos a partir de imagens (Radar-Landsat) e suas relações com a tectônica da Bacia do Paraná. São Paulo. Paulipetro, Consórcio CESP/IPT, relatório RT-342/82.
- Strugale M. 2002. Arcabouço e evolução estrutural do Arco de Ponta Grossa no Grupo São Bento (Mesozóico): Implicações na hidrodinâmica do Sistema Aquífero Guarani e na migração de hidrocarbonetos na Bacia do Paraná. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 154 p.
- USGS. EROS Data Center; Data Services Branch. Seamless Data Distribution System 2005. Disponível em: <http://seamless.usgs.gov/>. Acessado em: março de 2005
- Williams, D. 2005. Landsat 7 science data users handbook. Disponível em: http://ltpwww.gsfc.nasa.gov/IAS/handbook/handbook_toc.html. Acessado em: Abril de 2005.
- Zalán, P. V., Wolff, S., Conceição, J. C. J., Astolfi, M. A. M., Vieira, I. S., Appi, V. T. e Zanotto, O. A. 1987. Tectônica e sedimentação da Bacia do Paraná. Atas do III Simpósio Sul-Brasileiro de Geologia, **1**:441-473.
- Zalán P. V., Wolff S., Astolfi M. A. M., Vieira I.S., Conceição J. C. J., Appi V. T., Neto E. V. S., Cerqueira J. R. e Marques A. 1990. The Paraná Basin, Brazil. Tulsa: AAPG Memoir, **51**(1):681-708.