

## **Controle neotectônico do arranjo morfoestrutural da região de Cartagena, Colômbia.**

O. Aristizábal, Camilo<sup>1</sup>; Ferrari, André L.<sup>1</sup>; Silva G., Cléverson<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Departamento de Geologia. LAGEMAR – Universidade Federal Fluminense.

### **Resumo**

A geomorfologia e a geologia dos arredores da cidade de Cartagena, no Departamento de Bolívar, norte da Colômbia, refletem processos sedimentares e deformacionais, como produto de atividade tectônica compressiva regional de direção NW, com estruturas maiores como dobras anticlinais, sinclinais, falhas inversas de alto ângulo orientadas na direção NE-SW e falhas transcorrentes de caráter sinistral de direção NW-SE. Foram descritos detalhes dos resultados do geoprocessamento e das interpretações a partir dos modelos topo-batimétricos. Utilizando esta metodologia foi feita uma análise morfoestrutural ressaltando as feições lineares de direção aproximada E-W que se observam na plataforma continental e na zona emersa, com ajuda de modelos digitais de terreno (MDT). As feições geomorfológicas, identificadas por meio de sensoriamento remoto e analisadas durante o trabalho de campo, refletem claro controle estrutural na topografia e no relevo submarino. Esta análise permitiu discutir o mecanismo formador dos diápiros e vulcões de lama que caracterizam a região, em comparação com interpretações pretéritas de caráter mais regional. As feições lineares oblíquas ao esforço regional se relacionam diretamente com os locais de expulsão de lama e geoformas dômicas. Portanto, é possível que o controle principal da injeção de vulcões de lama esteja determinado pelo cisalhamento dextral de direção E-W e associado subordinadamente com as falhas sinistras NW-SE e as falhas dextras WNW-ESE. Essas características indicam a origem híbrida das estruturas geradoras do diapirismo de lama que, ao mesmo tempo, deformam os depósitos plio-pleistocênicos carbonáticos de plataforma rasa predominantes na área de estudo. Conclui-se, então, que a geomorfologia dos arredores de Cartagena está determinada pela deformação neotectônica associada às estruturas E-W secundárias aos esforços regionais NW-SE.

*Palavras chave: controle morfoestrutural, Cartagena, margem continental, geoprocessamento.*

## **Neotectonic control of the morphostructural arrangement of Cartagena region, Colombia**

### **Abstract**

The geomorphology and geology around Cartagena city, Colombia, reflect sedimentary and deformational processes that result of NW compressional tectonic activity with large anticline and syncline folds, NE-SW high angle thrust faults and NW-SE strike-slip sinistral faults. Details of geoprocessing and geomorphologic interpretations resulted from these topo-bathymetric models are described. A morphostructural analysis of linear features observed in the continental shelf and in the coastal zone was made from digital terrain models (DTM). The geomorphologic features identified on remote sensing images and analyzed during field work reflect clear structural control in the topography and submarine relief. This analysis opens discussions about the mechanisms that generated shale diapirs and mud volcanoes, typical features of this region, in comparison with previous more regional interpretations. The linear features oblique to the main stress are directly related with the mud expulsion places and with dome geomorphology. In consequence, it is possible the main control of mud volcanoes injection may be determined by E-W right-lateral shear and may just be associated subordinately with the NW-SE left-lateral strike-slip faults. These characteristics show the hybrid origin of the structures that generate the mud diapirs which deform the Plio-Pleistocene carbonate deposits that predominate on the continental shelf and coastal zone. In conclusion, the geomorphology around Cartagena region is determined by neotectonic deformation associated with E-W structures secondary to NW-SE regional stress.

*Key words: morphostructural control, Cartagena, continental margin, geoprocessing.*

## **1 Introdução**

O Caribe colombiano se encontra próximo da junção tríplice entre as placas de Cocos, do Caribe e da América do Sul, apresentando características tectônicas típicas de zonas compressivas e taxas de sedimentação continental relativamente altas devido à presença do rio Magdalena. Possui sismicidade de baixa magnitude ( $<5,4^{\circ}R$  com hipocentros  $<45$  km de profundidade), possivelmente associada à chamada “zona de subducção” do Caribe e à Falha de Oca-Ancón, estrutura importante no limite norte da placa sul-americana com a crosta oceânica da placa do Caribe. A borda continental colombiana é, portanto, uma região tectonicamente ativa.

A vinculação da morfologia costeira atual apenas com a variação relativa do nível do mar, não explica todas as feições encontradas. É necessário compreender os processos tectônicos que modificam a paisagem, definem a litologia da borda continental e moldam as estruturas que influem nas manifestações de atividade geológica na região.

A análise morfoestrutural representa uma das técnicas mais úteis para a caracterização da área deste estudo e se converte na base fundamental para a identificação das estruturas controladoras do relevo. A falta de detalhe topográfico e batimétrico na área de estudo motivaram a busca minuciosa de outras fontes de informação para a realização de um novo tratamento dos dados. Isto permitiu a unificação de todas essas informações dentro de uma mesma visualização, com o objetivo de interpretar as possíveis estruturas responsáveis pela formação das feições relacionadas ao diapirismo de lama, fenômeno neotectônico, muito característico da região de estudo.

## **2 Metodologia.**

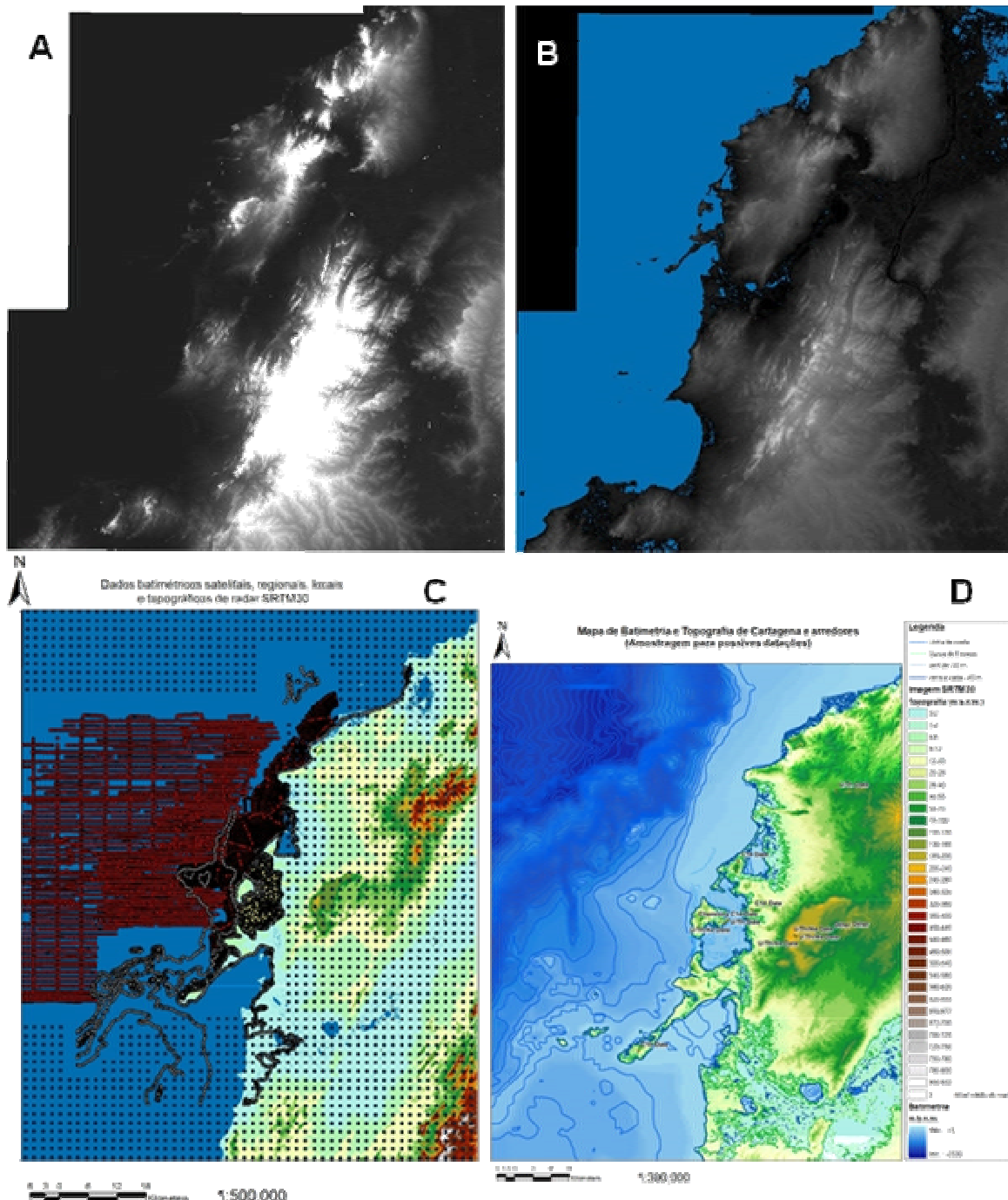
Todas as observações morfológicas e estruturais obtidas a partir de sensoriamento remoto e observações de campo foram georeferenciadas e armazenadas em bases de dados em formatos formatoa (DBF, XLS, TXT) do tipo XYZ (Geodas ou textual modificado), dependendo do software no qual iria ser analisado cada tipo de informação. Várias transformações têm sido feitas entre formatos para poder gerar mapas com extensão DXF, SHP, E00, y SRF. Da mesma forma, decidiu-se transformar as origens de coordenadas, e os arquivos cartográficos trasladados para o sistema UTM-WGS84, para facilitar o manejo de dados. O geoprocessamento e edição de mapas foram realizados, uma parte em ArcGis® v.9.2 e uma outra, na suíte SMT-TKS® v.8.1; os modelos digitais do terreno em Surfer® v.8.0.

Com o fim de obter topografia detalhada da zona costeira foi utilizada uma imagem SRTM3 Spaceborne Imaging Radar-C (SIR-C) bandas C/X em arcos de 3 segundos (resolução de 90 m) obtida do site da National Aeronautics and Space Administration (NASA) rasterizando os níveis de altura para semelhar o relevo em cores do espectro visível, do azul ao verde (figura 1 A-C). Também foi utilizada informação topográfica-base a diferentes escalas e cartografia geográfica do Defense Map Agency (DMA) em formato GEOTIF com resolução de 50 m, esc.: 1:50.000, para calibrar alturas e a localização de todas as feições, linhas sísmicas, estações de trabalho, amostragem e medições, batimetria regional, local e detalhada, como também para conseguir a guia de georeferenciamento de arquivos de mapas em formato TIF simples.

Por meio deste procedimento obteve-se um mapa que reúne, pela primeira vez, a batimetria e a topografia detalhadas da região de *Cartagena* (figura 1-D). Junto com essas informações, todas as observações, fotografias, perfis e desenhos de afloramentos, dados estruturais e demais anotações de campo foram sistematicamente armazenadas em camadas digitais para que possam ser consultadas e/ou atualizadas dentro de qualquer sistema de informação geográfica (SIG). As informações registradas na caderneta de campo foram armazenadas por completo em formato digital no software gratuito Geofield® v2.2 (abril-2003) elaborado pela Earth Science Austrália, exclusivamente para cartografia geológica.

Uma vez inserida, a informação foi exportada em formato SHP para que pudesse ser editada em ArcGis® 9.2. Este programa permite também exportar as bases de dados para arquivos DXF editáveis em Autocad e outras suítes de edição cartográfica. O formato *shape* facilita a edição dos arquivos para a apresentação final em qualquer tipo de estudos.

A informação batimétrica geral para o Caribe colombiano foi obtida a partir da base internacional do ETOPO2 (dados XYZ a cada 2 minutos). A batimetria regional para a área de estudo entre a planície abissal arredor do campo de exploração *Sinú* e a região emersa, foi obtida a partir de uma descarga mais densa de dados, da base ETOPO1 (a cada 1 minuto) da Universidade da Califórnia (website de Geodésia 2007). Entre a margem da plataforma adjacente até a linha de costa de *Cartagena* foram usados os dados batimétricos de cinco (5) cartas náuticas (cortesia da Universidade Nacional da Colômbia) e as curvas batimétricas a cada 40 m dos mapas do DMA, a fim de se obter maior detalhe batimétrico na área de estudo propriamente dita.



**Figura 1.** Imagem SRTM3 Spaceborne Imaging Radar-C (SIR-C) bandas C/X em arcos de 3 segundos, rasterizada com valores topográficos e batimétricos. Em A e B: antes e depois da classificação ráster e definição da linha de costa; em C, com classificação topográfica inicial e com os pontos XYZ de batimetria e topografia extraídos de cartas náuticas e do ETOPO1, utilizados para criar os MDT's; e em D, com contornos batimétricos e classificação topográfica completa.

A partir dos dados batimétricos e topográficos foi elaborada uma base de dados conjunta com o fim de construir, de forma geral, modelos digitais do terreno (MDT) regionais e locais preliminares em torno da área de estudo, usando o algoritmo de interpolação de *Krigging*, favorável segundo a densidade e distribuição dos dados reunidos.

### 3 Resultados

O novo mapa topográfico e batimétrico das vizinhanças de Cartagena (figura 2) permite perceber a morfologia predominante na zona costeira, caracterizada por uma topografia ondulada com morros isolados, como foi descrito por Molina *et al.* (1996), alongados segundo várias direções que sugerem controle estrutural. Trata-se de uma ampla planície costeira levemente inclinada para o mar, interrompida por morros e colinas, alguns de aspecto dômico radial e outros de forma ovalada, alongados preferencialmente na direção E-W, mas também em sentido WNW-ESE. Pode-se observar na figura 2 que a morfologia da plataforma adjacente, está evidentemente relacionada com a área emersa adjacente.

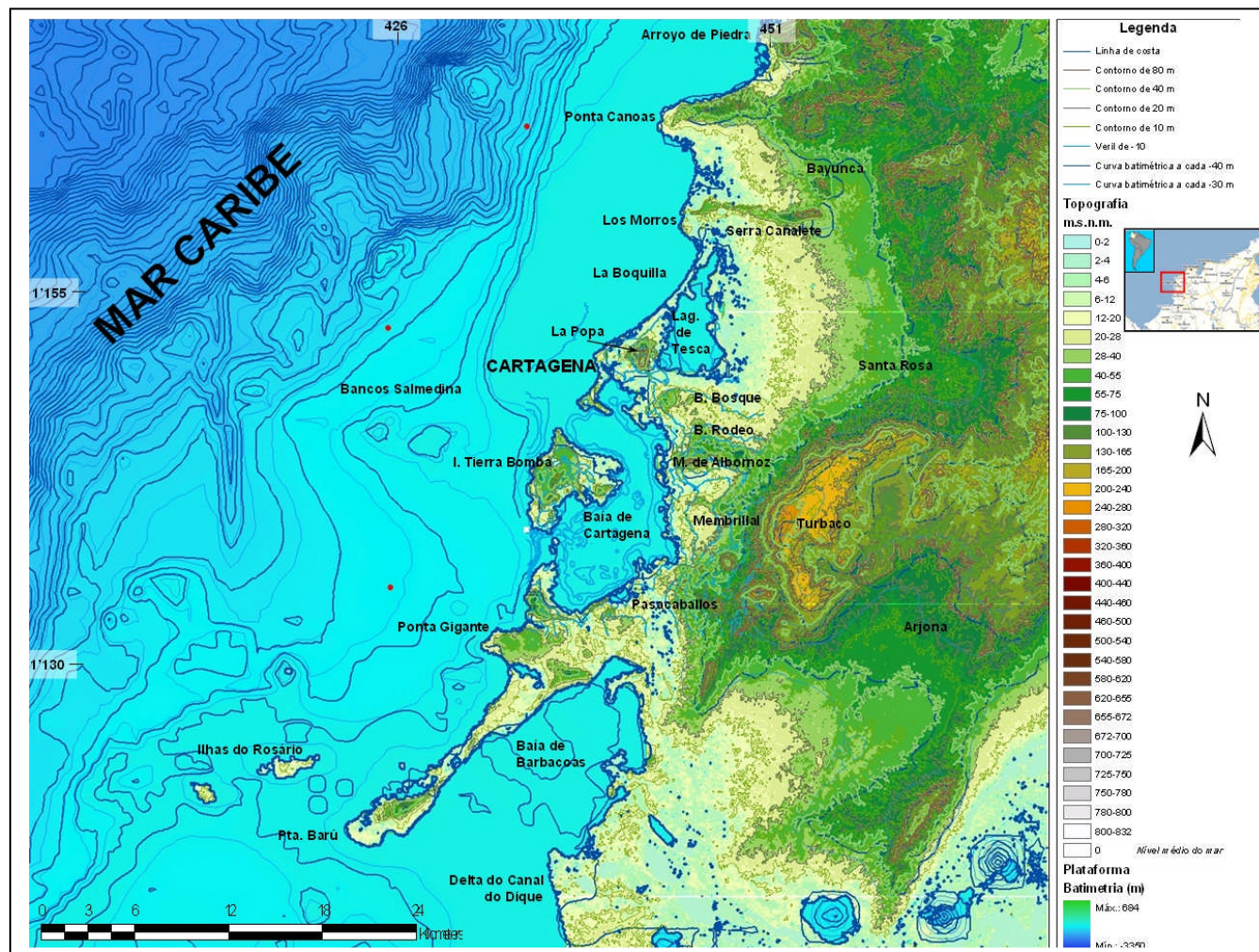
Os primeiros modelos tridimensionais já revelaram elementos topográficos e batimétricos alinhados entre a plataforma e a margem continental (figura 3).

Neste trabalho serão apresentadas as análises morfoestruturais, levando em conta sempre a importância da localização geográfica das feições e as estruturas identificadas, devido a que vários dos nomes utilizados para elas não terem sido mencionados anteriormente na literatura, mas que correspondem a locais reconhecíveis na cartografia. Por isso, a correta localização das estações de trabalho e o detalhamento batimétrico e topográfico (figura 4) foram tão importantes para a interpretação geomorfológica da plataforma interna e para a respectiva correlação com as feições morfoestruturais na zona emersa.

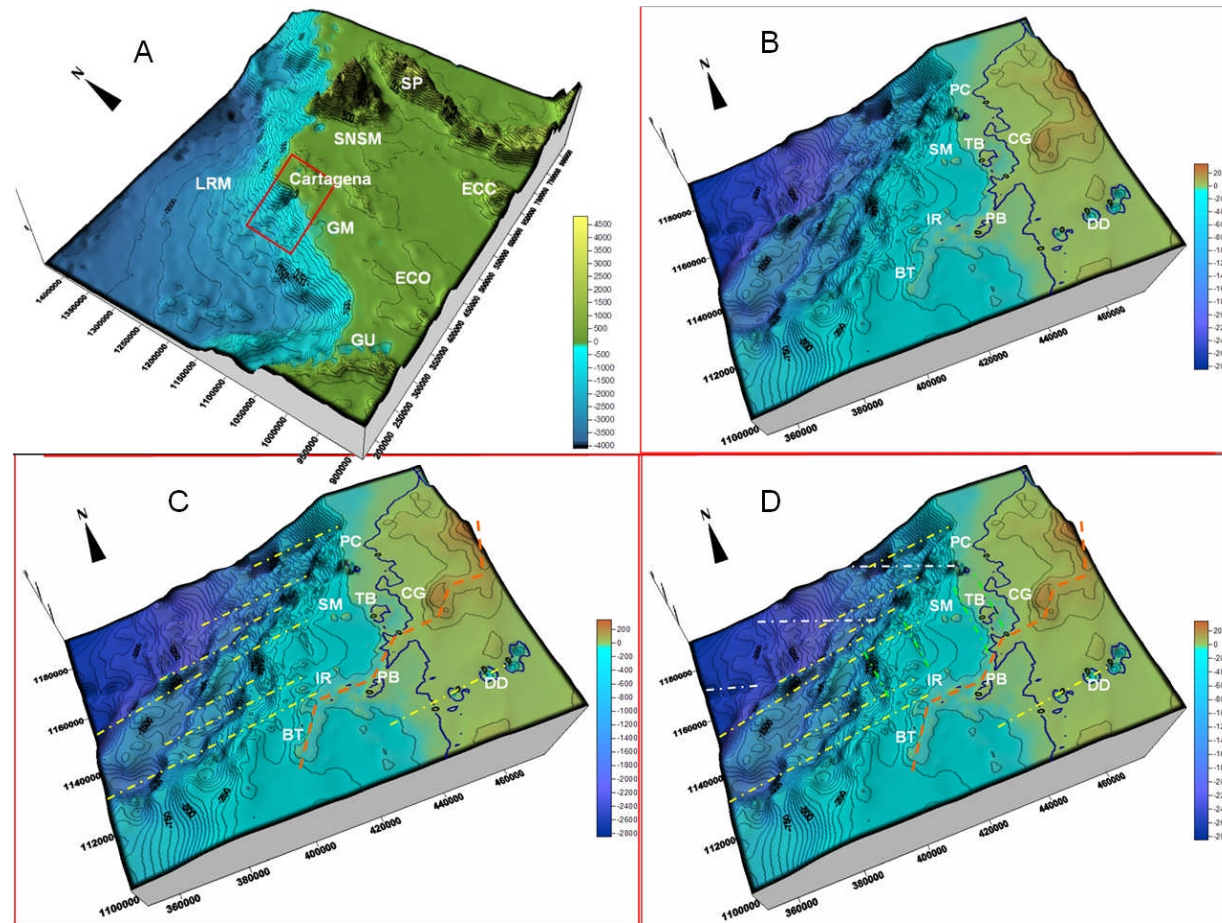
#### 3.1 Análise morfoestrutural

Com base na observação geomorfológica do mapa de relevo (figuras 2 e 3) e nas informações pretéritas, foram identificadas as quatro províncias geomorfológicas em que pode ser dividida a área de estudo (figura 4). São elas: Planície abissal (PA), Zona do prisma de acreção (ZPA), Proto-delta do rio *Magdalena* (PDRM); e região dos Cinturões Deformados Sinú e São Jacinto (CDSSJ).

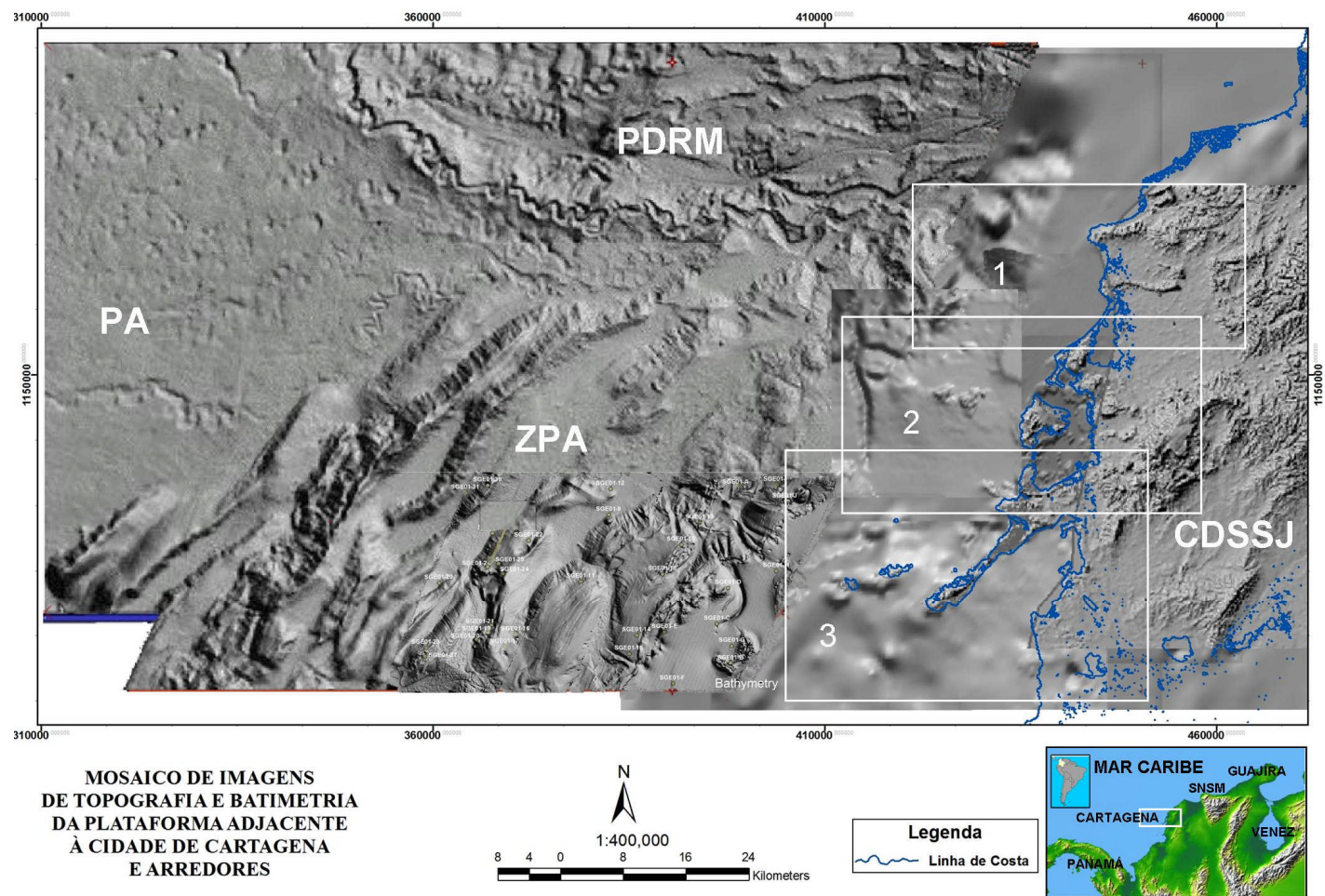
Os blocos tridimensionais revelaram feições geomorfológicas bastante interessantes entre a borda da plataforma e a zona emersa, que relacionam a morfologia dômica e os vulcões de lama com as estruturas avaliadas na zona emersa e com as falhas identificadas por interpretação sísmica.



**Figura 2** Mapa topográfico e batimétrico de detalhe dos arredores de Cartagena. Dados topográficos originais de imagem de radar SRTM30 (USGS) e dados batimétricos tomados do ETOPO1 e de cartas náuticas do CIOH (Armada colombiana), cedidas pela Universidade Nacional da Colômbia, Medellín. Projeção UTM-WGS84.



**Figura 3** Vista em 3D preliminar para o Caribe colombiano para a área de estudo. Em A: DTM de batimetria e topografia localizando a área de estudo dentro de um contexto geomorfológico regional (LRM: leque do rio Magdalena; SP: Serrania de Perijá; SNSM: Serra Nevada de Santa Marta; ECC: extremo da Cordilheira Central; GM: Golfo de Morrosquillo; ECO: extremo da Cordilheira Ocidental e GU: Golfo de Urabá). Em B, C e D, quadro vermelho ampliado em A com a batimetria e topografia local do bloco Sinú-Cartagena (PC: Ponta Canoas; SM: bancos de Salmedina; TB: ilha de Tierra Bomba; CG: Cartagena; PB: Ponta de Barú; IR: Ilhas do Rosário, BT: Banco Tortuga e DD: Delta do Canal do Dique). Linha de costa em azul escuro. Em C e D, as linhas a traços indicam quebras de relevo mais evidentes usando cores diferentes para cada tendência (E-W: amarelo, SE-NW: branco e N-S: verde).



**Figura 4** Aspecto do relevo entre a planície abissal (a oeste) e a zona emersa até o rio Magdalena (a leste), na região entre o bloco de exploração Sinú e os arredores de Cartagena. Imagem combinada de batimetria multibeam no bloco Sinú (levantamento feito pela TEPMA para ECOPETROL na década de 90), topografia e batimetria do ETOPO1 e cartas náuticas (CIOH, Armada colombiana, parte central e direita da figura) e topografia SRTM30 (direita região central; USGS). O controle estrutural na morfologia fica evidente. Os setores 1,2 e 3 como definidos no texto para descrição da análise morfoestrutural.

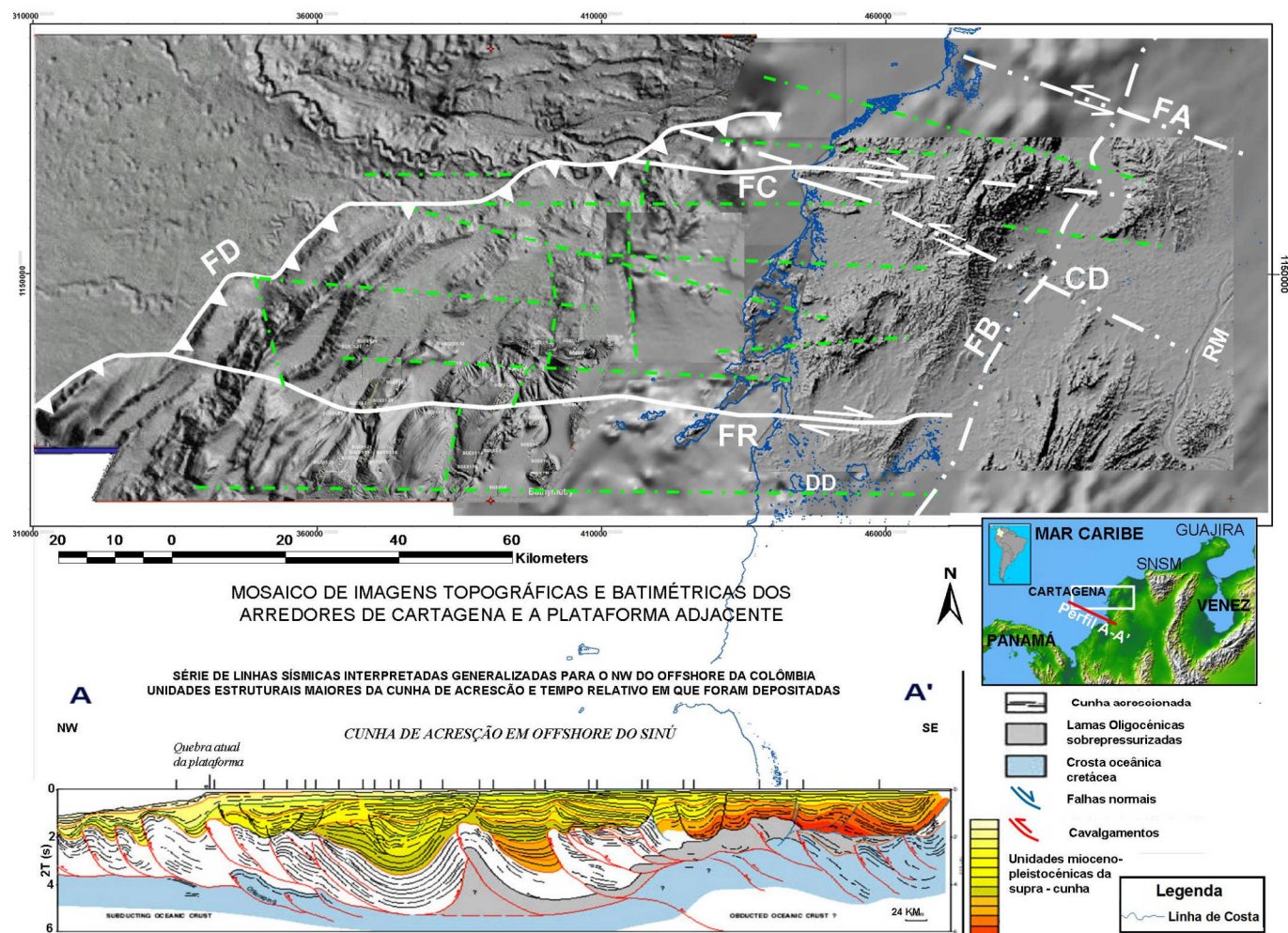


Do ponto de vista geral e como uma primeira apreciação dos resultados obtidos na primeira fase de geoprocessamento, as figuras 3 e 4 sugerem uma tendência morfoestrutural que corresponde ao controle na direção NE-SW. Isto concorda claramente com a geologia e a tectônica regional e a geologia local. Porém, pode se perceber ainda, que existe uma relação geomorfológica direcional entre as estruturas dômicas e os morros alongados em sentido E-W, por estarem alinhados nessa mesma orientação. Feições tais como morros, domos, vulcões e estruturas dômicas ou “abombamentos”, são correlacionáveis por se encontrarem alinhadas entre si e, ao mesmo tempo, por aparecerem alinhadas com depressões retilíneas e em locais onde afloram fraturas estriadas cuja orientação varia entre E-W e ESE-WNW (figura 5).

A análise morfoestrutural do mosaico de imagens foi feita levando em conta a interpretação regional para a cunha de acreção do noroeste colombiano (perfil A-A', figura 5). Identificaram-se as estruturas principais tanto na zona submersa como na zona emersa, havendo ganhado maior precisão na localização dos traços graças ao detalhe batimétrico e topográfico entre a planície abissal e a zona costeira nos arredores de Cartagena. O aspecto da superfície do terreno da nova imagem pode ser comparado com os resultados dos experimentos deformacionais descritos por Costa & Vendeville (2002) e Couzens-Schultz *et al.* (2003).

Da figura 4 se deduz claramente o domínio estrutural em sentido NE-SW. Porém, também é notável o controle em sentido E-W, principalmente governado pelas falhas de *Canoas* (FC) e do *Rosário* (FR) a norte e sul da área, respectivamente (figura 5). Também são perceptíveis as depressões em linha reta que se orientam junto com morros alongados nessa mesma direção, assim como os bancos e baixos coralinos (linhas a traços em cor verde). Nessa mesma figura, as falhas ressaltadas a traços brancos indicam o rumo inferido seguindo o lineamento associado.

Como é de observar, em termos gerais existe uma evidente continuidade entre a morfologia em *offshore* com a de *onshore*. Embora, o controle E-W é levemente perceptível para leste da *Falha inferida de Bolívar* FB (figura 5).



**Figura 5** Imagem de relevo entre o bloco de exploração Sinú e as vizinhanças de Cartagena com a interpretação estrutural regional para offshore do NW colombiano. Destacam-se as falhas regionais mais importantes (linhas brancas) e os lineamentos gerais relevantes para este estudo (linhas a traços verdes). FA: Falha de Apure, FB: Falha inferida de Bolívar, FC: Falha de Canoas, FD: Frente de Deformação, FR: Falha de Rosário, CD: Falha do Canal do Dique, DD: Delta to Canal do Dique, RM: Rio Magdalena.

Do ponto de vista geomorfológico, apenas feições regionais de direção NW-SE ficam em evidência na região oriental da área de estudo, como são os vales incisivos que formam as falhas de *Apure* e a do *Canal do Dique*. No entanto, existe também forte controle na direção aproximada WNW-ESE que pode estar intrinsecamente relacionada com os esforços compressivos regionais e que podem ser os responsáveis das estruturas controladoras dos focos de expulsão de lama e gás, na região de *Cartagena*.

Na figura 3-C unicamente ressalta-se o aspecto escalonado da topografia entre o mar e o continente (traços laranja), como já havia sido notado por outros autores (Vernette *et al.* 1992, Briceño e Vernette 1992). Adicionalmente, mostra-se que esse escalonamento ainda permanece na zona emersa, e que existem feições orientadas E-W (traços em cor amarela) que se relacionam com as quebras do relevo orientado NE-SW.

As feições em direção E-W, correspondentes às falhas secundárias ao esforço regional NW, são consideradas importantes neste estudo, porque aparentam estar geneticamente ligadas à reativação das emanações de lama e gás que atualmente caracteriza a região de *Cartagena* e o bloco de exploração *Sinú*.

Os lineamentos traçados na figura 3-D mostram as outras duas tendências secundárias nas direções, N-S (verde) e ESE-WNW (branco). Estes dois direcionamentos também se apresentam na zona costeira.

Com o objetivo de melhorar a visualização da morfologia do terreno nos arredores da baía de *Cartagena* e facilitar as descrições para ilustrar as observações geomorfológicas com base no novo mapa de relevo, a área de estudo foi dividida em três setores (figura 4). São eles:

- 1) *Ponta Canoas* (ao norte);
- 2) *Cartagena* (na região central);
- 3) Península de Barú (ao sul).

Esta visualização foi muito útil para correlacionar a interpretação sísmico-estrutural e as morfoestruturas regionais mais importantes com os resultados da análise cinemática e dinâmica.

Em cada setor, foram identificadas feições tais como domos, vulcões, vales, serras baixas e depressões, alinhadas e alongadas nas direções aproximadas E-W, ESE-WNW, SE-NW e N-S. Para exemplificar detalhes da análise, serão descritas a continuação parte das análises morfoestruturais. Em todas as ilustrações, resulta evidente a morfologia dômica dos morros de diferentes dimensões, alinhados ou alongados segundo indicam as linhas a traços.

### 3.1.1 *Setor 1: Ponta Canoas*

Pela linha de costa, este setor está compreendido entre *Ponta Cantera* (ao norte) e o extremo norte do morro *La Popa* (ao sul); e pelo interior da zona costeira de estudo, entre a região norte do município de *Bayunca* (ao norte) e a região sul do município de *Santa Rosa* (ao sul). Inclui também a plataforma adjacente e parte do talude continental (figura 6).

O setor 1 esta caracterizado principalmente pelo afloramento da *Falha do Canal do Dique* nas falésias entre o faro de *Ponta Canoas* e o corregimento homônimo. O contraste entre a planície costeira e os morros, colinas e serras menores que se projetam em direção ao interior.

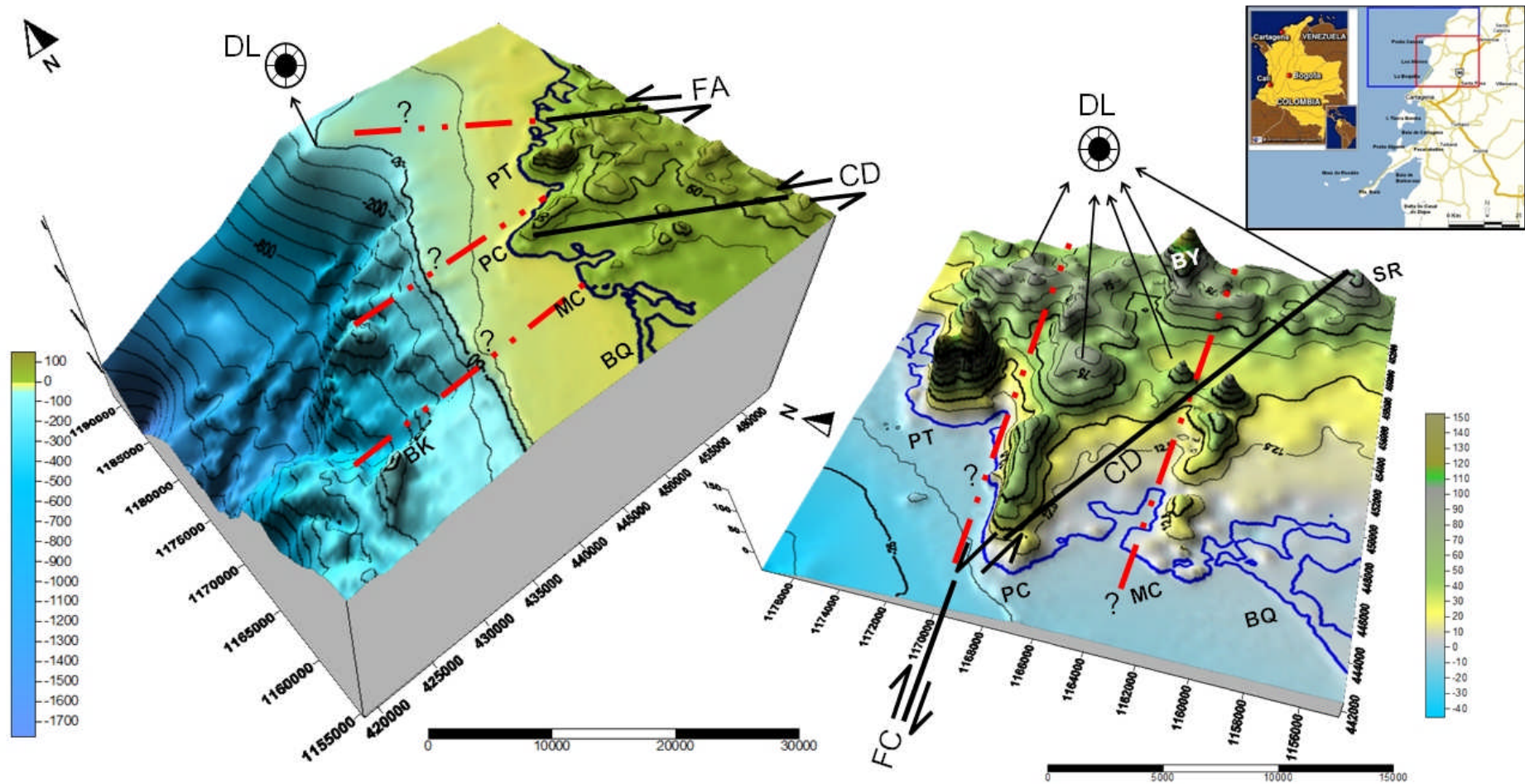
Ilustram-se na figura 6 os lineamentos e feições alinhadas entre a zona submersa e a zona emersa do setor 1 da área de estudo, deixando por enquanto aberta a possibilidade de propor controle estrutural pela presença de falhas.

O primeiro lineamento relaciona o vulcão de lama submarino localizado ao noroeste de *Ponta Cantera* com o vale longitudinal que prolonga o traço da *Falha de Apure*. O segundo lineamento importante da figura 6 está orientado E-W e fica bem mais evidente com a elevação topográfica longitudinal da Serra de *Los Monroes*, a leste de *Ponta Canoas*.

Esse segundo lineamento aponta na direção oeste para o vulcão de lama submarino localizado em frente de *Ponta Canoas*; e conecta para leste com o domo diapírico conhecido como *Morro de Ortega* e com outros vulcões de lama de menores dimensões que afloram na parte oriental entre a região dos *Arrayanes* e o município de *Clemência*.

Na parte sul do setor 1, a zona compreendida entre *Manzanillo del Mar* e a zona setentrional do bairro *La Boquilla*, está caracterizada por uma série de três colinas baixas costeiras conhecidas como *Los Morros* (*Morro Grande*, *Morro Del Médio* e *Morro Pequeño*). O terceiro lineamento de direção E-W no setor 1, comunica a oeste o paredão norte do *Banco Nokomis* com as falésias recifais de *Los Morros*, e a oeste com a “*cuesta*” que forma a serra longitudinal conhecida na região como *Serrania de Canalete*, em cujo extremo nordeste se soergue a colina dômica chamada *Loma El Cope*.

São duas as feições maiores alongadas na direção E-W que se encontram alinhadas em essa mesma orientação com estruturas dômicas, vulcões de lama e outros exemplos de manifestações de diapirismo de lama, no setor 1 (figura (6)).



**Figura 6** Análise morfoestrutural do setor 1: *Ponta Canoas*. À esquerda, vista do MDT localizado com o quadro azul. À direita, detalhe do MDT anterior localizado com o quadro vermelho. DL: manifestações de diapirosmo de lama. As falhas já cartografadas na literatura aparecem em linhas pretas; os lineamentos em linhas a traços vermelhos. FA: *Falha de Apure*, CD: *Falha do Canal do Dique*, FC: *Falha de Canoas*, PT: *Ponta Cantera*, PC: *Ponta Canoas*, MC: *Los Morros – Serrania de Canaleta*, BK: *Banco de Nokomis*, BQ: *La Boquilla*, BY: município de *Bayunca*, SR: município de *Santa Rosa*. Linha de costa em azul escuro. Escala e norte indicados em cada caso.

Um quarto e menos evidente lineamento no setor 1, conecta a desembocadura do *Arroyo Grande* com vários vulcões, domos e colinas dômicas menores que aparecem alinhadas na direção leste entre os municípios de *Pontezuela* e *Bayunca*.

A região entre os morros de *Manzanillo do Mar* e *Cerro La Popa*, a *Laguna de Tesca*, ao sudeste da serra de *Canalete* apresenta domos diapíricos colonizados por coroas de coral. O exemplo mais elevado dos domos coralinos dentro da zona urbana da cidade de *Cartagena* é o *Cerro La Popa* com 158 m.s.n.m.

### **3.1.2 Setor 2: Cartagena**

A zona central de área de estudo limita a oeste pela depressão oeste dos *bancos de Salmedina* e, pelo leste com o município de *Cañaveral*; pelo norte com o bairro *La Boquilla* e pelo sul com o município de *Pasacaballos* (figura 7).

Este setor se caracteriza pela presença do morro de *La Popa* e a ilha de *Tierra Bomba*, além da interessante depressão que forma a baía de *Cartagena*, limitada a leste e oeste por ilhas recifais longitudinais segundo N-S e por uma mudança brusca na topografia da ilha, de E-W para N-S. Além demais, paralelo a essa feição e na borda da plataforma, o “paleocanal” retilíneo se orienta N-S e se dispõe de forma linear com a ilha *Tesoro*. A figura 7 indaga acerca da possível existência de falhas que relacionem estruturalmente o caráter linear entre feições submersas como os *Bancos de Salmedina* os bancos da ilha *Tesoro*, com elevações topográficas da zona emersa, que além de estarem localizados justo a leste uns dos outros, às vezes apresentam alongamento na sua expressão topográfica.

A série de lineamentos orientados segundo E-W, começa pela região central da zona urbana de Cartagena, ligando o morro mais alto da ilha de *Tierra Bomba*, (conhecido como *Loma de Tierra Bomba*) com os morros de *Albornoz* no costado interior da baía e segue em direção leste, conectando-se com a região deformada que conforma o vulcão de lama do bairro *El Rodeo*, além de outros morros e colinas dômicas na região interior da zona de estudo.

Subparalelo a esse lineamento da zona emersa no setor 2, aparece com evidente controle no relevo desde a planície abissal (figuras 4 e 6) até a zona mais interior da área de estudo. Trata-se de uma série de feições alinhadas segundo WNW-ESE que vincula a ilha de *Tierra Bomba* e os bancos de *Burbujas* e *Salmedina* na plataforma interna. Os bancos alinham-se para leste com a grande colina dômica homônima à ilha (*Loma Tierra Bomba*) e com as do corregimento de *Caño de Loro*, no extremo sudeste da ilha, e se projeta

linearmente para o interior da baía com os baixos recifais e na zona emersa com os morros conhecidos como *Cerros de Albornoz*, o *Vulcão do Rodeo*, as montanhas calcárias recifais de *Membrillal* e logo depois, mais para leste, com o *Morro de Canta Rana*, colinas onde são exploradas as rochas carbonáticas de *Pedreiras Greacor*, ao nordeste do município de *Turbaco* (figura 7).

A figura 7 ilustra três afloramentos de estruturas medidas em locais onde foram interpretados lineamentos: uma fratura e duas falhas normais com componente destrolateral (a atitude dos planos aparece indicada). As três fotografias mostram o contato entre as argilas inferiores e os calcários recifais superiores e confirmam o controle estrutural na topografia e, por conseguinte, na geomorfologia.

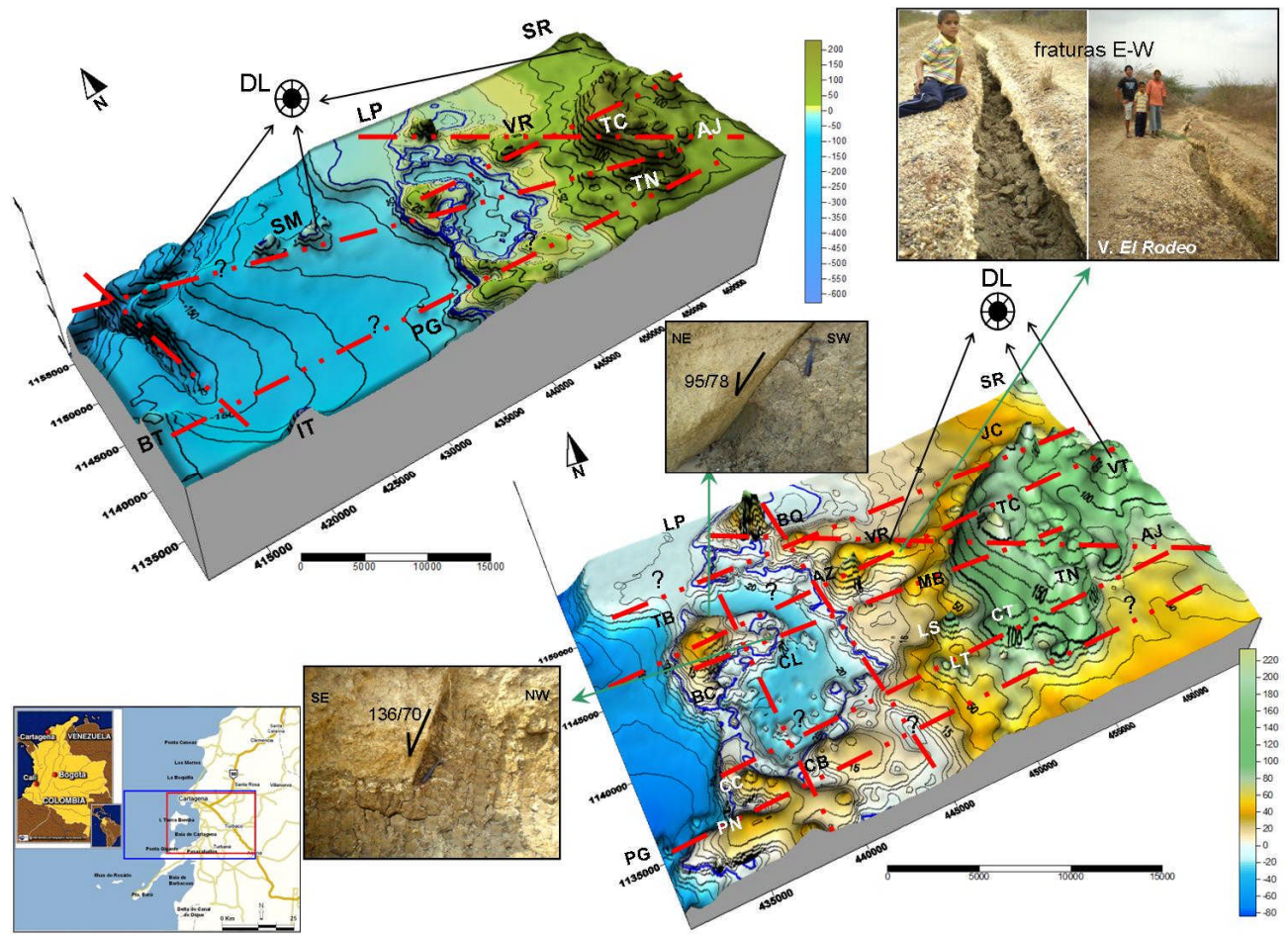
Especialmente, o caso do bairro *El Rodeo*, a sudeste da cidade, apresenta fraturamentos que provêm do vulcão homônimo, localizado a oeste do bairro. As fraturas têm afetado as vivendas dos moradores (figura 7, acima à direita). Situações similares se registram no corregimento de *Caño de Loro*. A falha encontrada na falésia ao sul do corregimento de *Tierra Bomba*, evidencia o controle estrutural na formação da baía mesmo, como pode ser deduzido dos lineamentos orientados N-S no bloco-diagrama inferior direito da figura.

Morfologicamente, os *Bancos de Salmedina* se encontram alinhados entre si e alongados também em sentido ESE-WNW. Neles se apresenta exumação de gás e lama por dentro dos recifes de coral (Briceño e Vernet, 1992), fenômeno também já registrado por pesquisadores da marinha (GIO 2005).

Similarmente, de forma linear estão conectados em direção E-W os *Bancos do Tesoro*, a crista (*cuchilla*) *El Carranco*, as colinas a sudeste do município de *Pasacaballos* e os morros que conformam a colina (*loma*) *El Siglo*, ao norte do município de *Turbana*.

Uma das mais importantes feições do setor 2, estão alinhadas a ilha “vulcânica” de *Tesoro*, com a colina alongada E-W de *Punta Gigantes* na região do corregimento de *Porto Nao*, as colinas alongadas da região de *Ararca* e o morro dômico conhecido como *Loma El Limón*, ao sul de *Turbana* (figura 7).

Um claro lineamento involucra em sentido NW-SE o famoso morro de *La Popa*, os bairros de *Bruselas* e *El Bosque*, a região dômica em cuja cima ergue-se o município de *Turbaco* e as colinas abombadas baixas do município de *Arjona* (figura 7).



**Figura 7** Análise morfoestrutural do setor 2 Cartagena. À esquerda, vista do MDT localizado com o quadro azul. À direita, detalhe em bloco 3D localizado com o quadro vermelho. DL: manifestações de diapirismo de lama. Os lineamentos em linhas a traços vermelhos. LP: *La Popa*, BG: bairro *Boca Grande*, BB: bairros de *Bruselas* e *Bosque*, AZ: morros de *Albornoz*, SR: município de *Santa Rosa*, VR: Vulcão do bairro *El Rodeo*, SM: bancos de *Salmendina*, JC: região de *Juan Congo*, MB: *Membrillal*, TB: corregimento de *Tierra Bomba*, BC: correg. de *Boca Chica*, CL: correg. de *Canoe Loro*, TC: mpio. de *Turbaco*, TN: mpio. de *Turbana*, AJ: mpio. de *Arjona*, CT: morro *Loma Carreto*, LS: *Loma El Siglo*, CB: mpio. de *Pasacaballos*, CC: *Crista El Carranco*, BT: *Bancos do Tesoro*, IT: *Ilha Tesoro*, PN: *Porto Nao*, PG: *Ponta Gigantes*. Linha de costa em azul escuro. Escala e norte indicados em cada caso.



Mais uma vez, com base nos modelos digitais de terreno da figura 7, a pergunta que surge observando essas características do relevo, é: existe alguma possibilidade de explicar o comportamento do terreno pela presença de falhas?

### 3.1.3 Setor 3: Península de Barú

Limita pelo lado oeste com a depressão oriental às *ilhas do Rosário*, pelo lado leste com a região sul do município de *Ballestas*, na parte setentrional do *Delta do Canal do Dique*. Limita pelo lado norte com os *Bancos de Tesoro*, a ponta sul de *Boca Chica* e as colinas do município de *Turbana* (figura 8).

Este último setor está caracterizado pela presença do grande *Banco Tortuga* (alongado e orientado segundo NE-SW), o arquipélago das *Ilhas do Rosário* (alongadas e alinhadas segundo E-W) e a *Península de Barú* (alongada segundo NE-SW com dobras anticlinais segundo ENE-WSW).

O principal lineamento do setor 3 está conectado á falha destrolateral do *Rosário*, porque ela se prolonga desde a borda da plataforma, orientando as ilhas em direção E-W e deslocando o sentido de orientação do banco *Tortuga* até a *ponta de Barú*. Alí a península retoma a orientação do banco e a feição E-W se projeta até encontrar os altos topográficos alongados segundo E-W que aparecem ao norte do *Delta do Canal do Dique*.

O seguinte lineamento importante neste setor controla a depressão entre as ilhas *Tesoro* e *Grande*, logo depois se prolonga com uma série de altos e baixos batimétricos até a península onde forma uma depressão lagunar conhecida como *Ciénaga de Puerto Naito*, e continua pela colina chamada de *Loma Marión* até o vulcão de lama do corregimento de *Santa Ana*. No extremo continental esse mesmo lineamento comunica com os domos diapíricos que conformam os altos topográficos de *El Evangelista* e *El Calvário*, na região nordeste do corregimento de *Ballestas*, mas tendo-se deslocado para nordeste segundo o controle da península (figura 8).

A figura 8 ilustra também o afloramento de uma dobra diapírica na ponta da *Península de Barú*. O aspecto mais interessante desta feição é a orientação do eixo em sentido ENE-WSW, além de expor o contato plio-pleistocénico (traços azuis) entre os silts argiláceos do membro basal e os calcários da *Fm. La Popa*.

Um dos mais importantes lineamentos da área de estudo, está no extremo sul do setor 3, que comunica a ponta austral do *Banco Tortuga* com os baixos coralinos ao sul da *ponta de Barú*, e logo depois continua para leste até encontrar a boca principal do *Delta do*

*Canal do Dique*, que já vem controlado em sentido E-W desde o interior da região emersa, quando desviado de NE-SW frente ao município de *San Pablo*.

Outras feições alinhadas no setor 3, porém um pouco menos perceptíveis e orientadas segundo N-S, controlam o relevo aparentemente escalonando a zona costeira em forma de degraus que descem desde a zona emersa até a borda da plataforma (figura 7), continuando aqueles descritos no setor 2, a um lado e outro da *Baía de Cartagena*, passando pelas localidades de *Ararca* e *Pasacaballos*, até a baía de *Barbacoas* (figura 8).

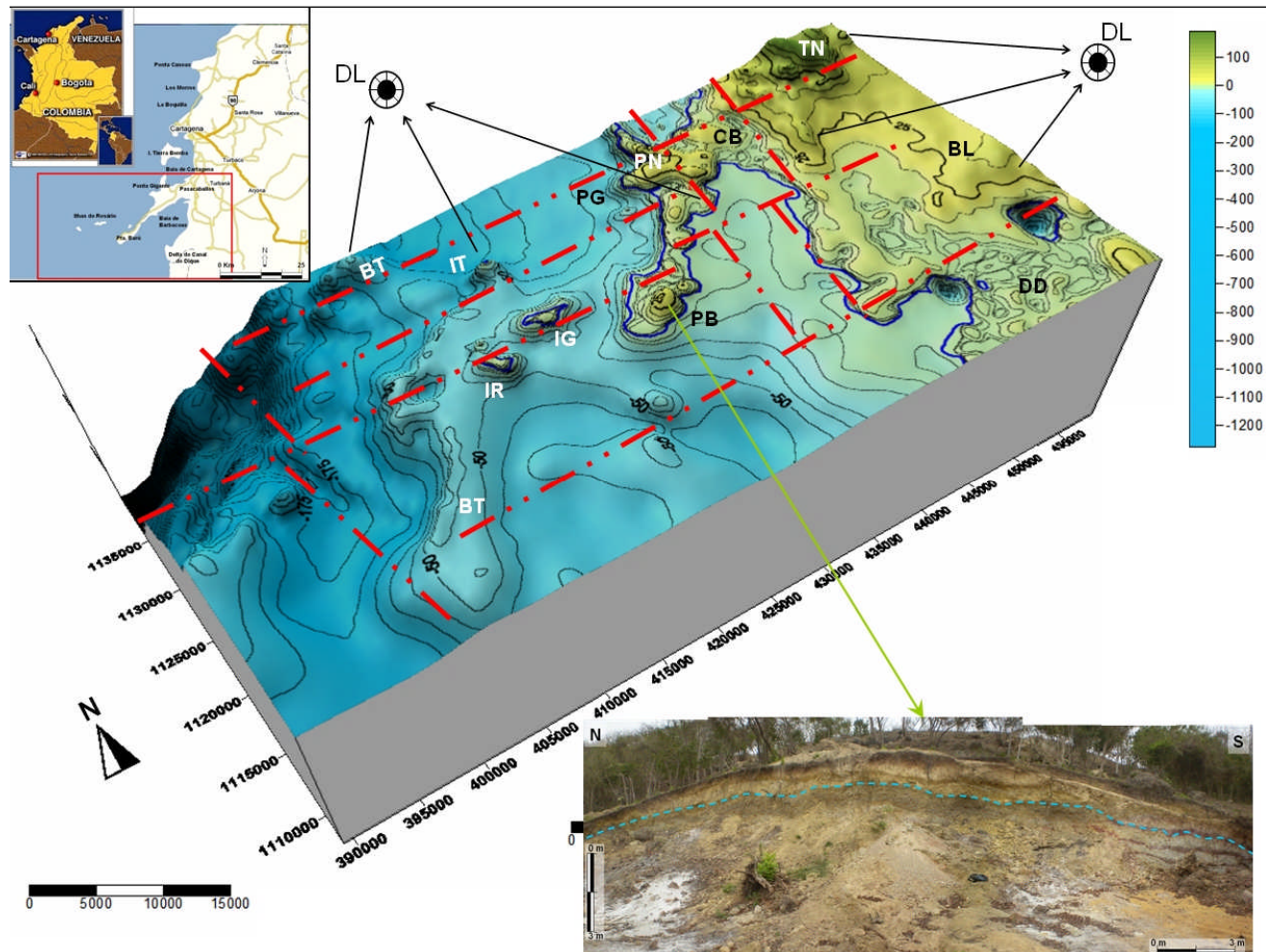
#### **4 Discussões**

As características geomorfológicas dominantes na área urbana de Cartagena têm sido relacionadas tanto à interação das placas convergentes Caribe, Sul-américa e Nazca, quanto à influência do diapirismo de lama (Ingeominas 2001). Tais fatores seriam os responsáveis pela conformação das colinas que circundam a cidade e a baía de Cartagena (*La Popa*, *Marión*, *Dow* e *Albornoz*), que se constituem nos paleo-altos que foram colonizados pelos corais no passado geológico. Para outros autores (Molina et al. 1996; Invemar 2002; Rangel e Posada 2005), a maior influência na geomorfologia da região costeira de Cartagena, tem sido exercida pelas variações relativas do nível do mar sem considerar, porém, a história geológica evolutiva e o arranjo estrutural devido à tectônica atual.

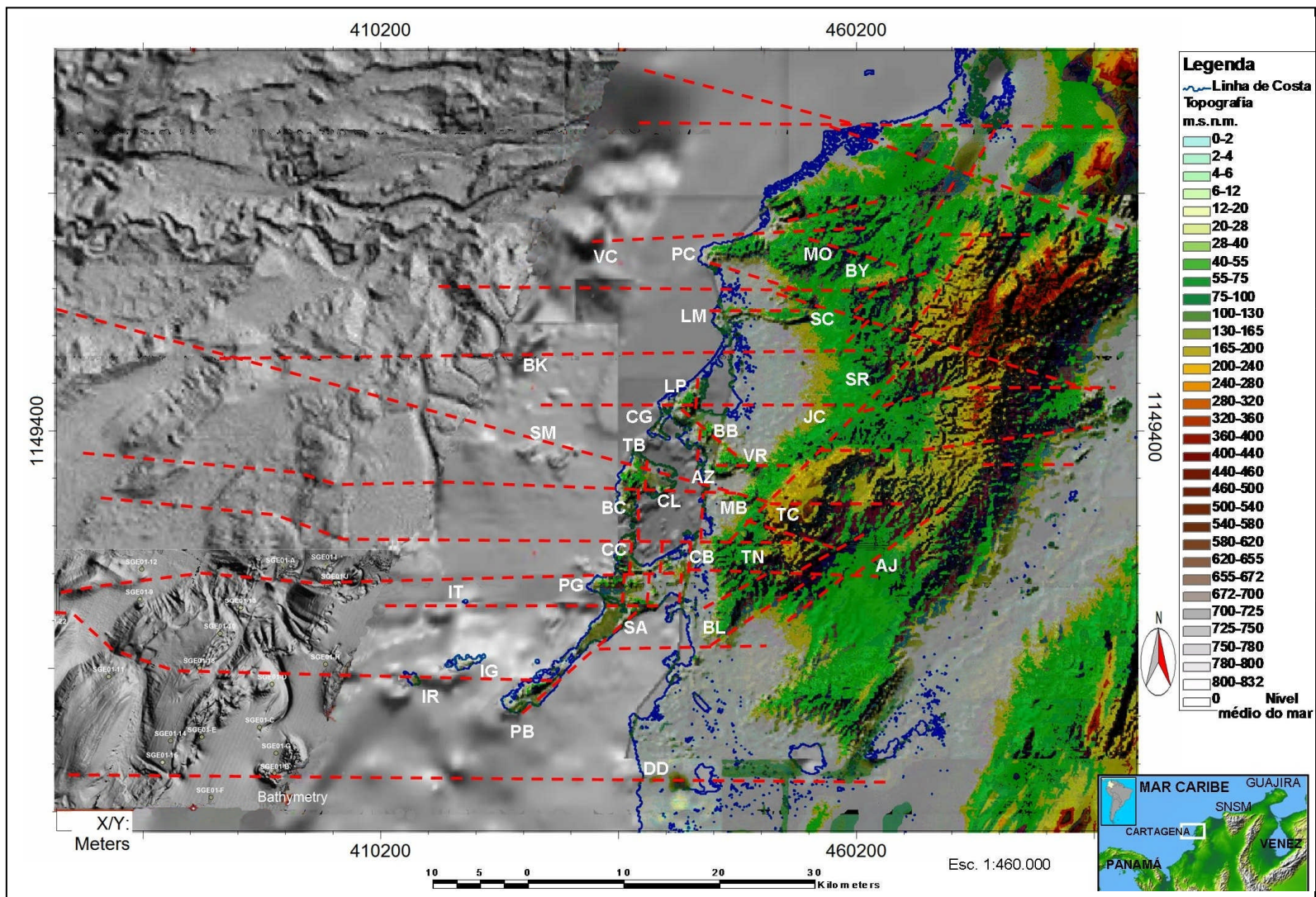
Neste trabalho, levando-se em conta a disposição geométrica das unidades estruturais regionais e o arranjo da rede de lineamentos que governam a geomorfologia descrita anteriormente, pode-se inferir que a área de estudo se encontra localizada dentro de um sistema de elipse deformacional relacionada a um sistema de falhas transcorrentes destrais de direção E-W, secundário a um esforço regional NW-SE. Este sistema é constituído de estruturas híbridas pelas quais o material argiláceo é expulso formando os vulcões e diápiros de lama, razão pela qual eles se encontram alinhados seguindo a direção das falhas secundárias.

#### **5 Conclusões**

O mapa de lineamentos aos quais se associa o diapirismo de lama na região de *Cartagena* resume as descrições morfoestruturais descritas acima (figura 9). Na parte norte da área, são mais evidentes as estruturas a partir da topografia que reflete o controle estrutural e a geomorfologia típica do diapirismo de lama.



**Figura 8** Análise morfoestrutural do setor 3, Península de Barú. MDT localizado com o quadro vermelho. DL: manifestações de diapirosmo de lama. Os lineamentos em linhas a traços vermelhos. IT: ilha Tesoro, TN: Mpio. de Turbana, PN: Correg. de Porto Nao, PG: Ponta Gigantes, CB: Mpio. de Pasacaballos, IG: Ilha Grande IR: Ilha Rosário, PB: Ponta de Barú, DD: Delta do Canal do Dique, BT: Banco Tortuga, BL: Mpio. de Ballestas. Linha de costa em azul escuro. Escala e norte indicados.



**Figura 9.** Mapa de aspecto de relevo dos arredores à cidade de *Cartagena*. Destacam-se em linhas a traços vermelhos as feições morfoestruturais alinhadas identificadas com base em descrições morfoestruturais. Convenções iguais às dos modelos 3D apresentados acima nas figuras 6 a 8.

Na região central, as feições mais importantes são os morros localizados a leste, alongados em sentido E-W (*Albornoz, Membrillal*), paralelos entre si, e alinhados com as colinas da ilha *Tierra Bomba* e os bancos de *Salmedina*. Na região sul, o padrão linear E-W está representado tanto pelos baixos recifais da *ilha Tesoro* e pela própria ilha, com as colinas de *Porto Nao, Ararca e Loma el Limón* na zona emersa, quanto pela linearidade e a forma alongada em sentido E-W do *Arquipélago do Rosário*, as colinas de *Ponta Barú* e as manifestações e o controle no percurso do delta do *Canal do Dique*.

Reconstruindo a geometria do falhamento regional junto com a do controle geomorfoestrutural, pode inferir-se que o bloco estudado cabe dentro de um sistema de falha transcorrente dextral. O presente trabalho revela, portanto, que a formação dos vulcões de lama, localmente associados com exumações de gás, obedece ao caráter híbrido das estruturas secundárias relacionadas aos esforços compressivos regionais NW-SE, vinculado às falhas transtensionais orientadas segundo as direções E-W, WNW-ESE e NW-SE.

## **BIBLIOGRAFIA**

BRICEÑO, L. A., VERNETTE, G. (1992) Manifestaciones del diapirismo de lodo en el margen colombiano del Caribe. *Geofísica Colombiana*. Bogotá, n. 1, p. 21-30.

COSTA, E. & VENDEVILLE, B. C. (2002) Experimental insights on the geometry and kinematics of Fol.-and-thrust belts above weak, viscous evaporitic décollement. Pergamon Press. *Journal of Structural Geology*. [S. l.], v. 24 p. 1729-1739.

COUZENS-SCHULTZ, B. A.; VENDEVILLE, B. C.; WILTSCHKO, D. V. (2003) Duplex style and triangle zone formation: insights from physical modeling. Pergamon-Press. *Journal of Structural Geology*. [S. l.], v. 25, p. 1623–1644.

GIO - GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN OCEANOLOGIA (2005) Rasgos Geomorfológicos In: Estudio Oceanográfico Integral de los Bancos de Salmedina, Caribe Colombiano. Cartagena de Indias: Escuela Naval Almirante Padilla; Bogotá: Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología “Francisco José de Caldas COLCIENCIAS; Medellín: Universidad Nacional de Colombia, p. 21-34.

INVEMAR (2002) NCCSAP Colombia: Definición de los sistemas bio-geofísicos y socioeconómicos debido a un cambio en el nivel del mar en las Zonas Costeras colombianas (Caribe, Insular y Pacífico) y medidas para su adaptación. In: Informe Técnico No. 4. Evaluación de Impactos, Efectos y Respuestas del Sistema Natural. Santa Marta. Colombia, 107 p. + anexos.

MOLINA, L. *et al.* (1996) Atlas geomorfología y aspectos erosivos del litoral Caribe colombiano: publicación geol. especial n° 21, Cartagena de Indias. Santafé de Bogotá: INGEOMINAS, 1 mapa. Escala 1:100.000

RANGEL B., N., POSADA, B. O. (2005) Erosión Costera a lo largo del Litoral Norte del Departamento de Córdoba, Colombia. In: Congreso Colombiano de Geología, 10, 2005, Bogotá. Memorias. Bogotá.

VERNETTE, G.; MAUFFRET, A.; BOBIER, C.; BRICENO, L.; GAYET, J. (1992) Mud diapirism, fan sedimentation and strike-slip faulting, Caribbean Colombian Margin. *Tectonophysics*. [S. l.], v. 202, p. 335-349.