

APLICAÇÃO DO ÍNDICE DE HACK NO RIO IPOJUCA PARA IDENTIFICAÇÃO DE SETORES ANÔMALOS DE DRENAGEM E RUPTURAS DE RELEVO

Kleython de Araujo MONTEIRO¹, Bruno de Azevedo Cavalcanti TAVARES¹,
Antonio Carlos de Barros CORREA^{1,2}

(1) GEQUA - Grupo de Estudos do Quaternário do Nordeste Brasileiro/Laboratório de Geomorfologia do Quaternário. UFPE.
Endereço eletrônico: kleython@hotmail.com.br ; brunoactavares@gmail.com ; dbiase2001@terra.com.br.

(2) Universidade Federal de Pernambuco - UFPE. Avenida Professor Moraes Rêgo, 1235 - Cidade Universitária, Recife.

- Introdução
- Materiais e Métodos
 - O rio Ipojuca
 - Contexto Geotectônico Regional
 - A Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE)
 - Parâmetros Morfométricos
 - Perfil Longitudinal de um rio
 - Índice de Hack ou Relação Declividade-Extensão (RDE)
 - Utilização do Índice de Hack para identificação de rupturas de relevo
- Resultados e Discussão
 - Perfil Longitudinal do rio Ipojuca
 - Anomalias de drenagem
 - Análise Litológica-Estrutural
- Considerações Finais
- Referências

RESUMO - A bacia hidrográfica do rio Ipojuca, localizada na porção oriental do Estado de Pernambuco, tem se mostrado de relevante importância aos estudos geomorfológicos da região. A bacia possui um controle estrutural marcado pelo encaixamento ao principal lineamento geológico regional, a Zona de Cisalhamento de Pernambuco. Para o presente estudo aplicaram-se à bacia dois parâmetros morfométricos: o Índice de Hack (IH), também chamado de Relação Declividade-Extensão (RDE) e o Perfil Longitudinal. Aliada a estes parâmetros também foi realizada uma análise litológico-estrutural no intuito de elucidar os controles das principais anomalias encontradas por meio da aplicação das técnicas morfométricas. Como resultado, foram delimitadas áreas de concentração de índices anômalos, com base em uma equidistância vertical 25 m, e suas relações de campo subordinadas, que permitiram definir rupturas regionais entre patamares topográficos, estabelecendo limite entre o Planalto da Borborema, strictu sensu, seu Piemonte e as áreas de acumulação fluvial próximas à costa.

Palavras-Chave: Rio Ipojuca, Morfometria, Planalto da Borborema.

ABSTRACT - *Application of Hack Index in the Ipojuca River to the identification of anomalous sections and knickpoints.* The Ipojuca river watershed is located in the eastern portion of Pernambuco State, Northeast of Brazil, and displays important features for the geomorphological studies in the region. The watershed is structurally controlled and follows the trend of the major regional lineament, the Pernambuco Shear Zone. Two morphometric parameters were applied to the basin: Hack Index (HI) and the longitudinal profile. Coupled to these parameters a litho-structural analysis was carried out aiming at revealing subjacent controls to the morphometric anomalies found in the area. As a result, clusters of anomalous morphometric values were defined, based on a 25 m contour equidistance, as well as their subordinated field relations, thus permitting the spatial delimitation of boundaries among the Borborema Highlands, its piedmont and the adjacent fall-line close to the coastal plains.

Keywords: Ipojuca River, Morphometry, Borborema Highlands.

INTRODUÇÃO

Análise de redes drenagem tem se mostrado um parâmetro para identificação de patamares de relevo com grande aceitação e aplicabilidade na literatura geomorfológica contemporânea. Dentre os diversos usos das técnicas morfométricas, destaca-se a identificação de setores anômalos do perfil longitudinal de um determinado canal, em relação ao seu perfil de equilíbrio. Uma

drenagem, entendida como um canal possuidor ou não de água corrente (CHRISTOFOLETTI, 1980) indica, e muitas vezes reflete, a dinâmica geomorfológica do sistema no qual está inserida. Se o canal encontra-se encaixado em um vale profundo ou se possui vales amplos, se apresenta um padrão meândrico ou retilíneo, se corre sobre um leito rochoso ou entulhado de sedimentos, todos estes aspectos são causa e

efeito da dinâmica do sistema geomorfológico da região e sua evolução dinâmica.

Entre diversas análises, uma em especial trata da relação entre a drenagem e a morfometria do relevo sobre o qual a mesma se insere. A Relação Declividade x Extensão, ou simplesmente índice RDE, como denominada por Etchebehere (2000) e aplicada na Bacia do Rio do Peixe, oeste do Estado de São Paulo, foi inicialmente proposta por Hack (1973) com vistas a estabelecer um índice comparativo entre o comprimento do canal e a declividade do relevo (*Slope-Lenght Index*). Esta razão

indicaria setores ao longo do canal que estariam em acordo ou desacordo com o perfil “normal” de equilíbrio. Seguindo a determinação da ocorrência de setores em desacordo com o perfil “normal”, procede-se à interpretação dos controles espaciais de cada anomalia. As possibilidades interpretativas variam desde os controles lito-estruturais, como dureza da rocha e zonas de falhamentos, até o uso da terra, como ocorre no caso da formação de bolsões de sedimentos que ao desviarem o curso “normal” do rio estabelecem um setor anômalo.

MATERIAIS E MÉTODOS

O Rio Ipojuca

A bacia hidrográfica do rio Ipojuca se localiza na chamada região hidrográfica do leste oriental e possui área de 3.435,34 km², representando 3.5% do território do estado de Pernambuco (Figura 1). Escolheu-se trabalhar com esta bacia em virtude do rio Ipojuca representar a drenagem que secciona o maior número de unidades morfoestruturais que compõem o Planalto da Borborema.

Em seu principal curso o Rio Ipojuca tem extensão superior a 250 km, com direção predominantemente W-E. Sua nascente está localizada na mesorregião agreste do Estado de Pernambuco, na Serra do Pau D’arco no município de Arcoverde. Em grande parte de sua extensão possui um trajeto encaixado ao principal eixo de falhas da Zona de Cisalhamento Pernambuco. Nestas áreas, de clima sub-úmido e semiárido, as estruturas possuem grande importância no controle da drenagem em virtude da exiguidade das coberturas intemperizadas. Os totais pluviométricos anuais médios variam entre 700 e 800 mm.

O rio Ipojuca apresenta um padrão de vazão intermitente desde a sua nascente até o município de Chã Grande, no agreste pernambucano, a cerca de 80 km da foz. A partir desse município ele se torna perene ao adentrar a faixa costeira com pluviosidade variando de 1.200 a 1.500 mm. É importante ressaltar que por mais de 150 km o rio Ipojuca atravessa uma região com déficit

hídrico, com chuvas concentradas ao longo de 3 meses sob forma torrencial em sua maioria. A torrencialidade da precipitação responde, em muitos trechos, pela falta de canalização dos rios tributários, sendo a incisão do fundo do vale retomada ou não no próximo evento chuvoso. Este tipo de dinâmica fluvial caracteriza as paisagens descritas como de *cut-and-fill*, típicas dos ambientes semiáridos (BRIERLEY & FRYIRS, 1999; SOUZA, 2014).

Contexto geotectônico regional

A bacia do rio Ipojuca têm sua nascente localizada sobre o compartimento morfoestrutural caracterizado por Corrêa *et al* (2010) por Maciços Remobilizados da Zona Transversal, marcado pela presença de zonas de cisalhamento de direção E-W e NE-SW, como a Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE). Esta ZC condiciona o curso do rio desde a sua cabeceira até os setores de piemonte da Borborema, que antecedem o Planalto *stricto sensu*.

Este setor da Província Borborema (BRITO NEVES *et al*, 2001a, 2001b, 2001c; ALMEIDA *et al*, 2000) se caracteriza por apresentar mega-cisalhamentos destrais, assim como o Lineamento Patos, paralelo à ZCPE, e situado cerca de 200 km ao norte dessa. Ambas ZCs são extremamente importantes para compartimentação morfoestrutural da região, e mormente do Planalto da Borborema.

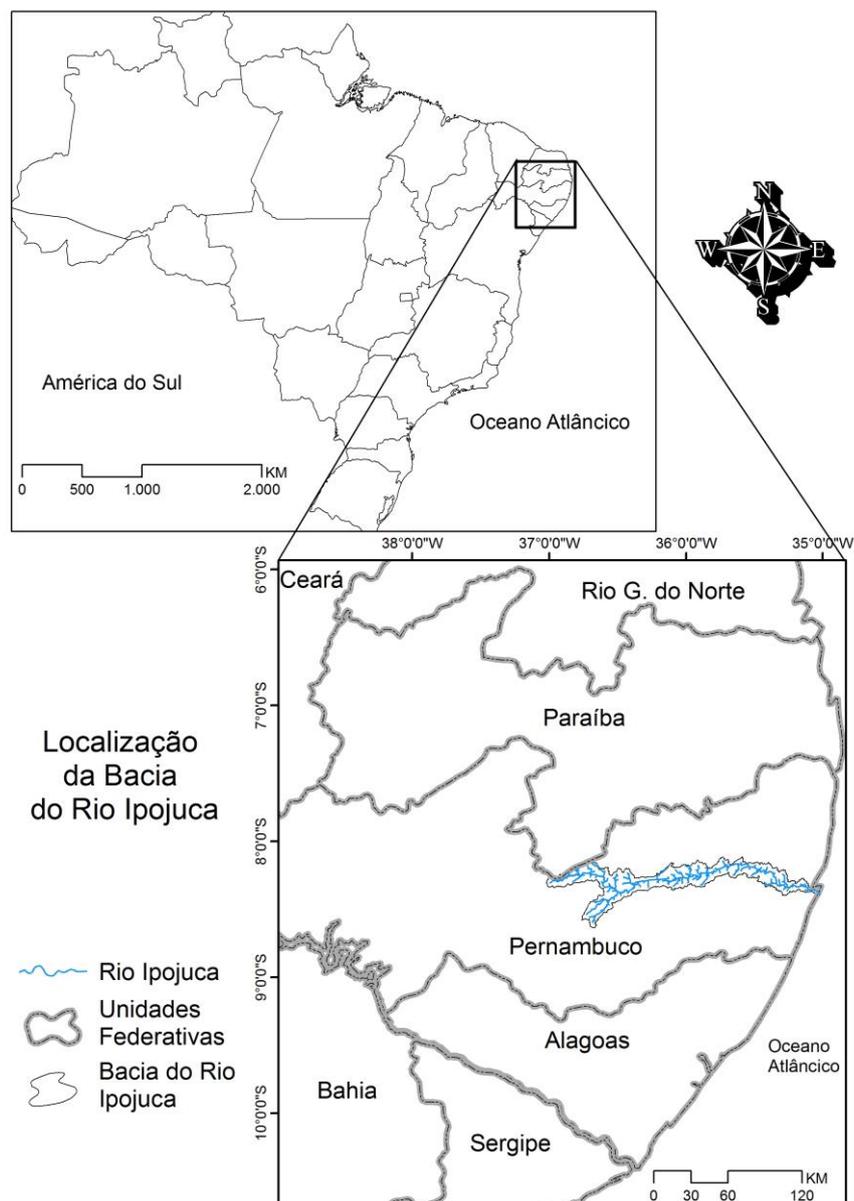


Figura 1. Localização da bacia do Rio Ipojuca.

A Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE)

A ZCPE constitui uma Zona de Cisalhamento destal contínua, localizada na porção central da Província Borborema, possuindo mais de 700 km de comprimento. A mesma foi dividida em duas: A ZCPE oeste e ZCPE leste (MELO, 2002). A bacia do rio Ipojuca está inserida, em grande parte, na ZCPE leste, que se inicia na zona costeira e tem uma extensão de 200 km em direção ao oeste do Estado de Pernambuco, com presença de faixas miloníticas de baixa e alta temperatura (MELO, 2002). Existe também a proposição de uma ligação entre esta ZC e sua correspondente africana, a Adamoua-Ngaundaré (ALMEIDA, 1965 segundo BRITO NEVES *et al.*, 2001a).

A ZCPE tem direção preferencial E-W com ligeiros desvios nas porções ocidental e oriental. Sua gênese está atrelada ao ciclo Brasileiro (700-500 Ma) tendo sido reativada durante a ruptura do Pangea (Brasil-África) (MAGNAVITA, 1992). Essas reativações criaram zonas miloníticas de direção E-W e também nas suas ramificações de direção NE (SOUSA *et al.*, 2012). Estudos recentes também têm demonstrado reativações sismogênicas atribuídas a estas estruturas (FERREIRA *et al.*, 2008; LOPES *et al.*, 2010; BEZERRA *et al.*, 2011; OLIVEIRA e MEDEIROS, 2012). Esses pulsos tectônicos têm reativado antigos falhamentos do Neoproterozóico gerando deformações de idade cenozoica e criando espaços de acomodação para a deposição dos

sedimentos neogênicos (BEZERRA *et al.*, 2008; BEZERRA *et al.*, 2011; GURGEL *et al.*, 2013).

Em virtude de se encontrar localizado neste contexto geotectônico, o rio Ipojuca mostrou-se como uma drenagem de importância elevada a ser quantificada através da aplicação de métodos morfométricos com o intuito de estabelecer uma relação entre a drenagem e os processos de deformação crustal com repercussão geomorfológica.

Parâmetros morfométricos

As relações entre os rios e as formas de relevo são percebidas desde a antiguidade greco-romana com Heródoto, Aristóteles e Estrabão entre os primeiros a traçar tais relações. No fim do século XIX, de acordo com Christofolletti (1969), a análise morfométrica de bacias foi bastante utilizada, sendo, no entanto, deixada de lado com o surgimento dos postulados de Davis (1899) acerca da evolução cíclica do relevo. O pensamento davisiano atribuía à morfogênese uma temporalidade muito mais ampla, na escala de milhões a centenas de milhões de anos, escala esta que menosprezava um estudo mais detalhado da drenagem (BIGARELLA, 2003; MONTEIRO, 2010).

Apenas no fim da primeira metade do século XX, com a publicação do trabalho de Horton (1945) sobre a hierarquia da rede de drenagem houve um retorno aos estudos morfométricos. Horton (1945) procurou estabelecer leis, mediadas pela linguagem matemática, de desenvolvimento dos rios e suas bacias, iniciando uma nova fase dos estudos de morfometria de drenagem, abrindo espaço para diversas abordagens sobre o tema.

Posteriormente diversos autores postularam considerações acerca de parâmetros e índices morfométricos em canais e bacias de drenagem. Strahler (1952) propôs um método de hierarquização de canais fluviais que continua sendo utilizado até os dias atuais devido à sua agilidade e eficácia de aplicação. Esta proposta de ordenamento de canais entende que cada ordem deve ser estudada e comparada separadamente a fim de se analisar a rede hidrográfica de uma bacia. Outra proposta que merece destaque é a de Shreve (1966) que apresentou o conceito de magnitude de drenagem, estando junto com a proposta de

Strahler entre as grandes contribuições para estudos posteriores, visto que uma vez estabelecidos ordem e magnitude das drenagens, os cálculos de outros atributos tornam-se mais fáceis.

A partir da década de 1960 ocorreu uma crescente utilização da perspectiva sistêmica em geomorfologia. O modelo interpretativo davisiano, dominante até meados do século XX, foi sendo gradativamente substituído pela análise processual, que considera a dinâmica da superfície como de extrema importância para o desenvolvimento das formas (CHRISTOFOLETTI, 1980).

Este período coincide com uma retomada da perspectiva positivista físico/matemática que aliada à geomorfologia processual culminou na geração de uma grande quantidade de tentativas de entendimento da dinâmica evolutiva do relevo baseadas na observação e mensuração dos fatos geomorfológicos, intermediadas pelo uso da linguagem matemática e embasadas nas leis físicas (CHRISTOFOLETTI, 1980; MONTEIRO, 2010).

Na tentativa de estabelecer um método quantitativo que demonstrasse de forma numérica se um rio estaria em equilíbrio geomorfológico, a partir de uma relação entre a declividade e a extensão do canal fluvial, Hack (1973) desenvolveu o *StreamLength-Gradient Index (SL Index)*, também conhecido como Índice de Hack (IH). No Brasil este método foi também denominado de Relação Declividade-Extensão (RDE) por Etchebehere (2000).

Hack (1973) propôs este índice para servir como elemento de fácil identificação de anomalias nos cursos d'água, onde a partir da elaboração do perfil longitudinal do rio, seria possível identificar alterações no seu curso, relacionando o potencial hidráulico ($\Delta h/\Delta l$, onde Δh é a diferença altimétrica ou projeção vertical e Δl é a projeção horizontal) do canal e o efetivo trajeto (L) que o mesmo percorre em cada setor desde o ponto de interesse até a cabeceira do rio, fornecendo índices que permitiriam comparar trechos fluviais de diferentes magnitudes de vazão (MARTINEZ, 2005). Estas comparações revelariam setores processualmente "anômalos" ao longo da drenagem, onde o valor do índice oscilaria de acordo com o substrato e sua estrutura. Em

áreas de margem continental ativa este método vem sendo utilizado para análises do ajuste da drenagem aos movimentos tectônicos (TROIANI & DELLA SETA, 2008). Sobre os setores de margem continental passiva, o índice tem sido aplicado no intuito de corroborar as pesquisas relativas à erosão diferencial, além de ser ferramenta importante na identificação de deformações neotectônicas intraplaca (MISSURA, 2005; ETCHEBEHERE *et al.*, 2006; MONTEIRO, 2010).

Perfil Longitudinal de um Rio

O perfil longitudinal de um rio é entendido como sendo a curva obtida através de dados plotados em gráfico de coordenadas cartesianas, cujas coordenadas correspondem à altitude (H) em relação à distância da jusante (L) expressa pela equação:

$$H=f(L)$$

da qual a tangente resultante expressa o gradiente do canal no trecho estudado (MARTINEZ, 2005).

McKeown *et al* (1988) enfatizam que a forma do perfil longitudinal de um curso fluvial deve ser entendida como em equilíbrio (*graded*) ao apresentar uma típica forma côncava. Para Hack (1957) o perfil vai refletir o estado de equilíbrio da drenagem e qualquer alteração no mesmo levaria o rio a se ajustar na busca de um novo equilíbrio, erodindo seu próprio leito ou gerando agradação.

A partir desta ideia, entende-se que trechos da drenagem que estejam fora da curva de equilíbrio indicam que a drenagem encontra-se desajustada. Nestes casos pode-se interpretar as anomalias como indicativas de atividade tectônica recente (ETCHEBEHERE *et al.*, 2004), assim como de diferença estrutural ou litológica sobre a morfologia do sistema (MONTEIRO, 2010).

“Índice de Hack” ou Relação Declividade-Extensão (RDE)

Ao propor o emprego de um índice que relacionasse a declividade e a extensão do rio para identificar trechos fora do padrão considerado normal, Hack (1973) contribuiu para evidenciar e favorecer a identificação de setores anômalos no gradiente do perfil longitudinal, tomando como pressuposto que este deveria apresentar uma diminuição gradativa da declividade desde a cabeceira até a foz (MARTINEZ, 2005).

O índice de Hack por trecho é calculado através da seguinte fórmula:

$$SL_{\text{trecho}}=(\Delta h/\Delta l)*L$$

onde Δh é a diferença altimétrica entre dois pontos selecionados do curso d'água, Δl corresponde à projeção horizontal do trecho analisado e L é a extensão total do canal desde a nascente até o ponto final para onde o índice está sendo calculado. A figura 2 apresenta de forma ilustrativa a relação:

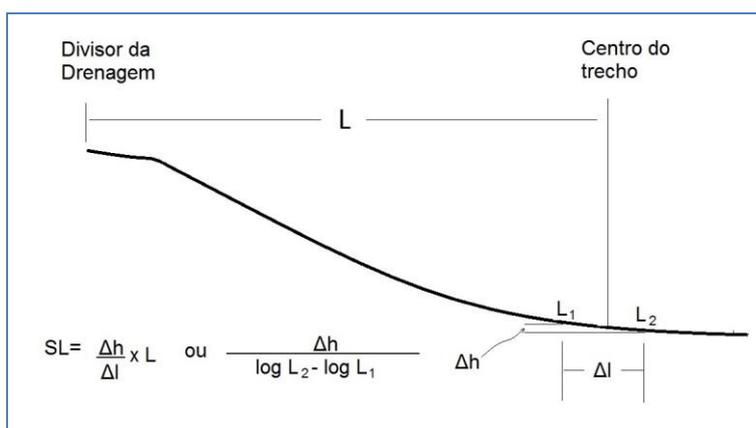


Figura 2. Esquema modificado de Hack (1973) utilizado para cálculo do índice RDE.

Hack também apresentou uma segunda forma de calcular o índice, de maneira que não se precise obter a projeção horizontal (Δl), mas apenas a projeção vertical Δh e a distância do trecho em análise até sua cabeceira (L). Nesta segunda opção divide-se o Δh pelo valor da

diferença do logaritmo natural do ponto mais distante do trecho até sua cabeceira (L_2) e do logaritmo natural do ponto mais próximo do trecho até sua cabeceira (L_1) (Figura 2).

Da mesma forma é possível calcular o IH de um canal fluvial em toda a sua extensão.

Para isto considera-se a diferença altimétrica entre a cota superior e a inferior do canal, ou seja, o ΔH da cabeceira até a foz (em metros) e o logaritmo natural da extensão total do curso de água, sendo a fórmula:

$$SL_{total} = \Delta H / \ln L$$

Seeber & Gornitz (1983) consideraram como anômalos os índices de SL_{trecho} que, quando divididos pelo índice de SL_{total} , resultaram em valores acima de 2 (dois). Estas anomalias se subdividem em anomalias de segunda ordem, cujo os valores estão entre 2 (dois) e 10 (dez) e as anomalias de primeira ordem que possuem valores igual ou superior a 10 (dez). As anomalias de primeira ordem são encontradas em trechos onde a declividade é bastante elevada, enquanto que as anomalias de segunda ordem são encontradas em trechos com declividade pouco acima da curva normal para o padrão da drenagem.

Utilização do índice de Hack para identificação de patamares de relevo

Tratando do equilíbrio dinâmico HACK (1975) asseverou que as drenagens são estabelecidas quase que instantaneamente ao desenvolvimento do relevo. Desta forma, o autor propôs um índice para quantificar a competência erosiva das drenagens e sua relação com o perfil longitudinal. Esse é resultado da disputa entre as forças erosivas, que retiram material, a força tectônica que adiciona material e as estruturas que aceleram ou retardam tais forças. Hack portanto estabelece o índice de forma a determinar um valor indicativo da competência erosiva de uma drenagem, que por sua vez traduziria o estágio de equilíbrio da mesma em função de sua relação com a declividade do terreno.

Na proposição do índice foi sugerido que os trechos analisados fossem delimitados a cada entrada de um afluente no tronco principal, pois ao receber uma carga adicional de água e sedimentosa competência da drenagem principal é alterada. Esses afluentes também eram quantificados. Diversos artigos foram publicados reproduzindo tal proposição

com resultados bastante satisfatórios e contribuíram de forma excepcional para o desenvolvimento dos estudos de drenagem.

Entretanto esta ferramenta pode também nos dar um indicativo mais preciso de localização de áreas onde ocorram importantes rupturas de gradiente, *knickpoints*, havendo então a possibilidade da identificação mais objetiva de patamares de relevo por meio dos valores de anomalias encontrados. Não obstante, ao se calcular o IH com base unicamente na definição de trechos delimitados pela chegada de afluentes de maior porte, pode-se subestimar a identificação mais pormenorizada de *knickpoints*, sobretudo em circunstâncias morfoclimáticas semiáridas onde não ocorram tributários de vazão significativa.

Embora, à época de sua proposição as discussões acerca dos controles exercidos pela tectônica sobre a drenagem ainda fossem incipientes, a aplicação contemporânea do IH permite um maior entendimento sobre feições de relevo de pequena escala e sua relação aos eventos rasos de deformação crustal mesmo dentro do contexto intraplaca.

No presente trabalho o índice de Hack (IH) foi aplicado de forma a identificar rupturas de gradiente (*knickpoints*) de maneira prolífica. Para tal, os trechos foram delimitados a cada curva de nível de 25m, ou seja, para cada variação de 25 metros de altitude se estabeleceu um trecho a ser calculado e quantificado, produzindo maior detalhamento na identificação das rupturas de declive ao longo do canal principal do rio Ipojuca. Após a elaboração de uma tabela de valores com os índices de IH_{trecho} , foi realizada a relação destes com o IH_{total} para identificação de anomalias, como proposto por Seeber & Gornitz (1983). A partir de então foram elaborados mapas para melhor ilustrar a distribuição de tais anomalias. Posteriormente foram feitas visitas à campo para verificação das áreas onde foram identificadas anomalias de primeira ordem no intuito de comprovar a ocorrência ou não de rupturas de declive e seus elementos de controle geológico subjacentes.

RESULTADOS e DISCUSSÃO

A aplicação do Índice de Hack (IH) ao canal do rio Ipojuca possibilitou a geração de

uma tabela de valores e posterior elaboração do seu perfil longitudinal. Estes valores foram

plotados em ambiente GIS gerando mapas que permitem visualizar a relação entre a distribuição espacial desses dados e o compartimento geomorfológico sobre o qual se encontram.

Perfil Longitudinal do rio Ipojuca

Os dados de altimetria e distância percorrida pela drenagem foram plotados em

tabela permitindo a elaboração de um perfil longitudinal do rio Ipojuca (Figura 3). Ao longo do perfil percebe-se na cabeceira e na área mais próxima à foz que a linha de melhor ajuste, em escala logarítmica, encontra-se abaixo da curva do perfil longitudinal do rio, indicando áreas de predominância de processos erosivos.

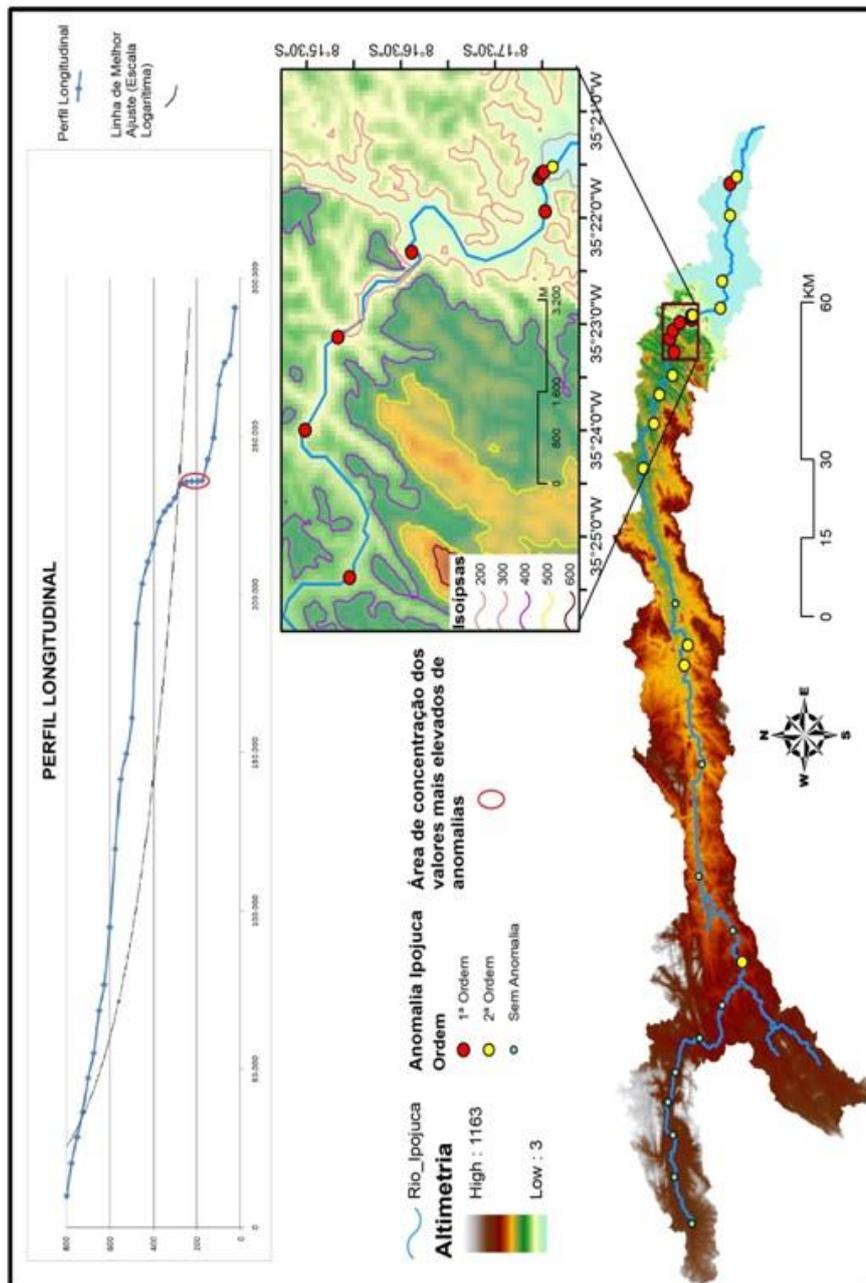


Figura 3. Perfil longitudinal do rio Ipojuca e distribuição das anomalias de drenagem segundo aplicação do IH.

Na cabeceira a maior declividade controla essa resposta erosiva, enquanto que próximo à foz a litologia menos resistente, o aumento da carga hídrica, já sob clima tropical úmido, e o afastamento da principal estrutura

geológica regional (a ZCPE) podem atuar em conjunto para o aumento da capacidade erosiva do canal. Na porção central do perfil, que se sobrepõe à linha de melhor ajuste, evidencia-se uma maior resistência à erosão em resposta ao

sistema de basculamento do macrodomo da Borborema (CORREA *et al*, 2010) e sua sobreposição à ZCPE. Esta região do Planalto, de acordo com diversos autores, ainda possui esforços isostáticos responsáveis pela manutenção de sua morfologia em flexura e resultante relevo elevado. Plútons brasileiros e rochas metamórficas de alto grau se distribuem regionalmente também impondo uma maior resistência ao trabalho erosivo sob domínio dos climas tropicais sub-úmido e semiárido.

Anomalias

A figura 3 ilustra também o resultado da aplicação do método de Seeber & Gornitz (1983) onde o IH de cada trecho do rio é dividido pelo IH encontrado para todo seu curso, permitindo a identificação de setores considerados anômalos.

Como dito anteriormente, os valores abaixo de 2 são considerados normais ou "não-anômalos", os valores entre 2 e 10 caracterizam uma anomalia de 2ª ordem, enquanto que os valores acima de 10 representam anomalias de 1ª ordem. Estas anomalias de primeira ordem se concentram na bacia entre as cotas de 350 e 175 metros, alcançando o maior valor ao longo da cota de 200 metros, o que vem a definir esta cota como a principal ruptura regional de patamar topográfico, estabelecendo o limite entre o Planalto *stricto sensu* e o seu Piemonte. Este valor indica a menor distância horizontal existente entre dois pontos para a equidistância trabalhada (25 metros, neste caso). Sobre este setor, para uma distância horizontal de aproximadamente 900 metros ocorre um desnível de 100 metros entre os patamares do relevo, delimitando claramente uma área de *knickpoint*.

Com exceção desta área destacada de concentração de anomalias de 1ª ordem (Figura 4 A, B, C, D e F) ocorre apenas mais um único trecho onde verificou-se uma anomalia elevada. Este trecho se localiza na região de transição entre os complexos cristalinos e os depósitos sedimentares mais recentes próximos à costa, o que permitiu a definição de uma zona de rápidos ou *fall-line* regional, marcando o limite exterior do Piemonte (Figura 4 E). Neste setor, onde os sedimentos inconsolidados entram em contato lateral com complexos metamórficos de alto grau, cria-se um patamar erosivo,

quantificado pelo IH como sendo também uma anomalia de 1ª ordem.

No intuito de validar a eficácia do método e verificar a ocorrência de controles geológicos em escala de detalhe, foram realizadas incursões a campo. Assim pode-se estabelecer a existência de fato, na paisagem, dos *knickpoints* aferidos graficamente nos trechos onde o IH apresentou anomalias de 1ª ordem. Em todos os setores considerados verificou-se a ocorrência de rápidos, corredeiras e cachoeiras (figura 4).

Análise Litológica-Estrutural

A área de estudo, como descrita anteriormente, é composta por um complexo de rochas das mais variadas idades, resultantes do saldo erosivo de stocks litológicos de orogenias antigas e movimentos transcorrentes de reativação, mais recentes. Na Figura 5 pode-se observar um esboço geológico da área, ressaltando a ocorrência de suítes intrusivas e complexos metamórficos de alto grau, com presenças de gnaisses e migmatitos, refletindo uma organização geotectônica herdada sobretudo do meso- e neoproterozóico. As áreas com maior ocorrência de trechos de drenagem anômalos são encontradas na transição de uma suíte intrusiva leucocrática com o complexo Belém do São Francisco. Não obstante, o contato entre as suítes intrusivas neoproterozóicas e suas encaixantes regionais é comumente marcado por Zonas de Cisalhamento, de direção geral NE-SW, que definem o *trend* topográfico das linhas de encosta da região. Supõe-se que a concentração de anomalias morfométricas sobre estas estruturas indiquem que as mesmas têm sido continuamente reativadas, sob a forma de *knickpoints* locais ou regionais.

Álveolos restritos de recuo de escarpa, à montante destes setores anômalos, muitos ainda com colmatação dos seus níveis de base por depósitos colúvio-aluviais pleistocênicos, indicam o papel localizado da erosão remontante sobre os patamares sobreelevados a cavaleiro dos desnivelamentos, o que sugere a retomada recente das componentes verticais das deformações e a ineficácia do sistema morfoclimático semiárido em produzir significativas endentações de *backwearing* entre as áreas desniveladas.

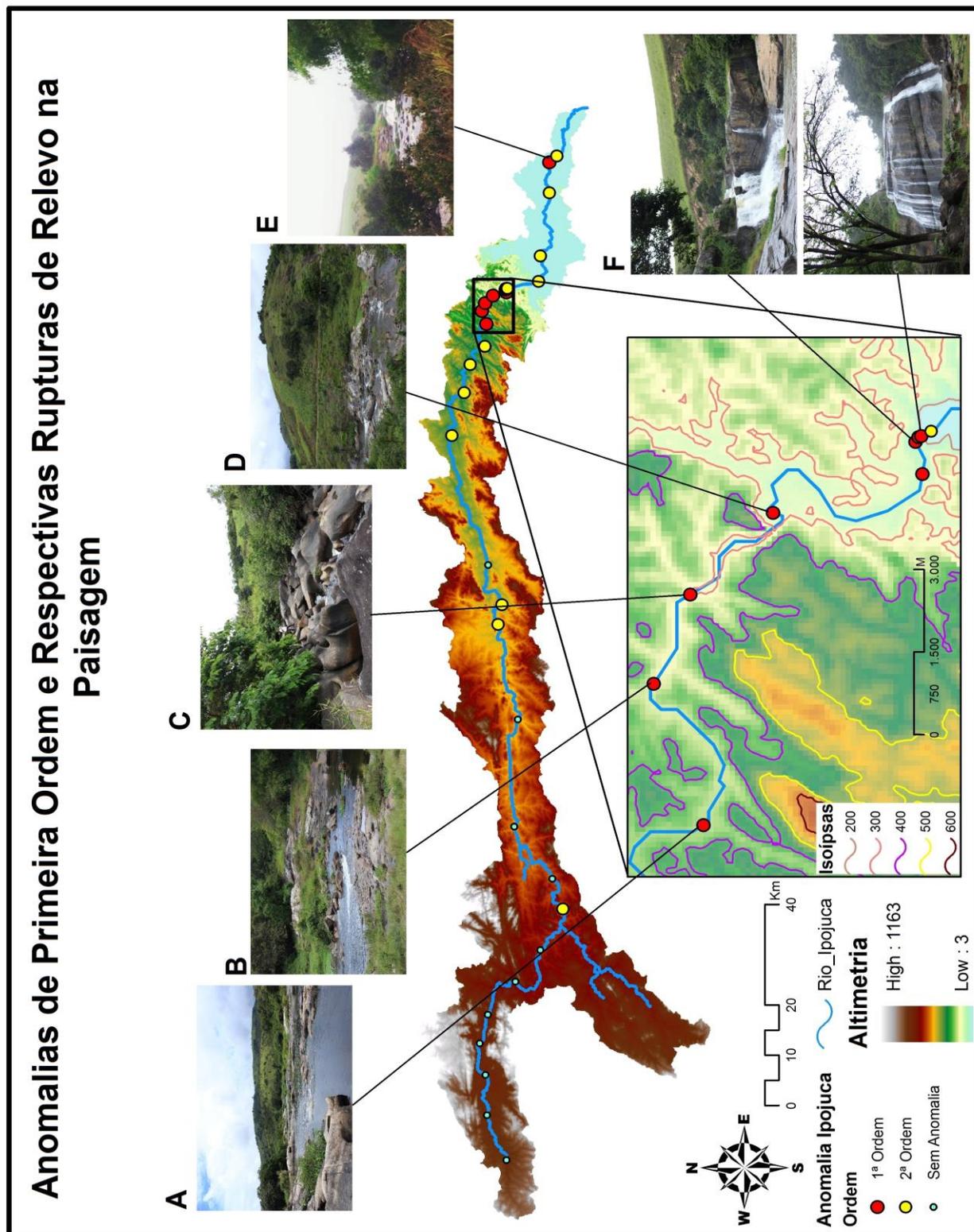


Figura 4. Verificação em campo da ocorrência de *knickpoints* nos locais onde as anomalias de 1ª ordem foram identificadas (A, B, C, D). E corresponde ao *knickpoint* encontrado no trecho fora da área de concentração das anomalias de 1ª ordem. Este trecho corresponde à anomalia representante da zona de transição entre os complexos cristalinos e os depósitos sedimentares junto à costa (*fall-line*). No trecho do canal onde o valor da anomalia foi o mais elevado, entre as curvas de 225 m e 175 m, é encontrado o maior *knickpoint* da região, a Cachoeira do Urubu (F). Esta isoípsa define a principal ruptura regional de patamar topográfico, estabelecendo o limite entre o Planalto stricto sensu e o seu Piemonte.

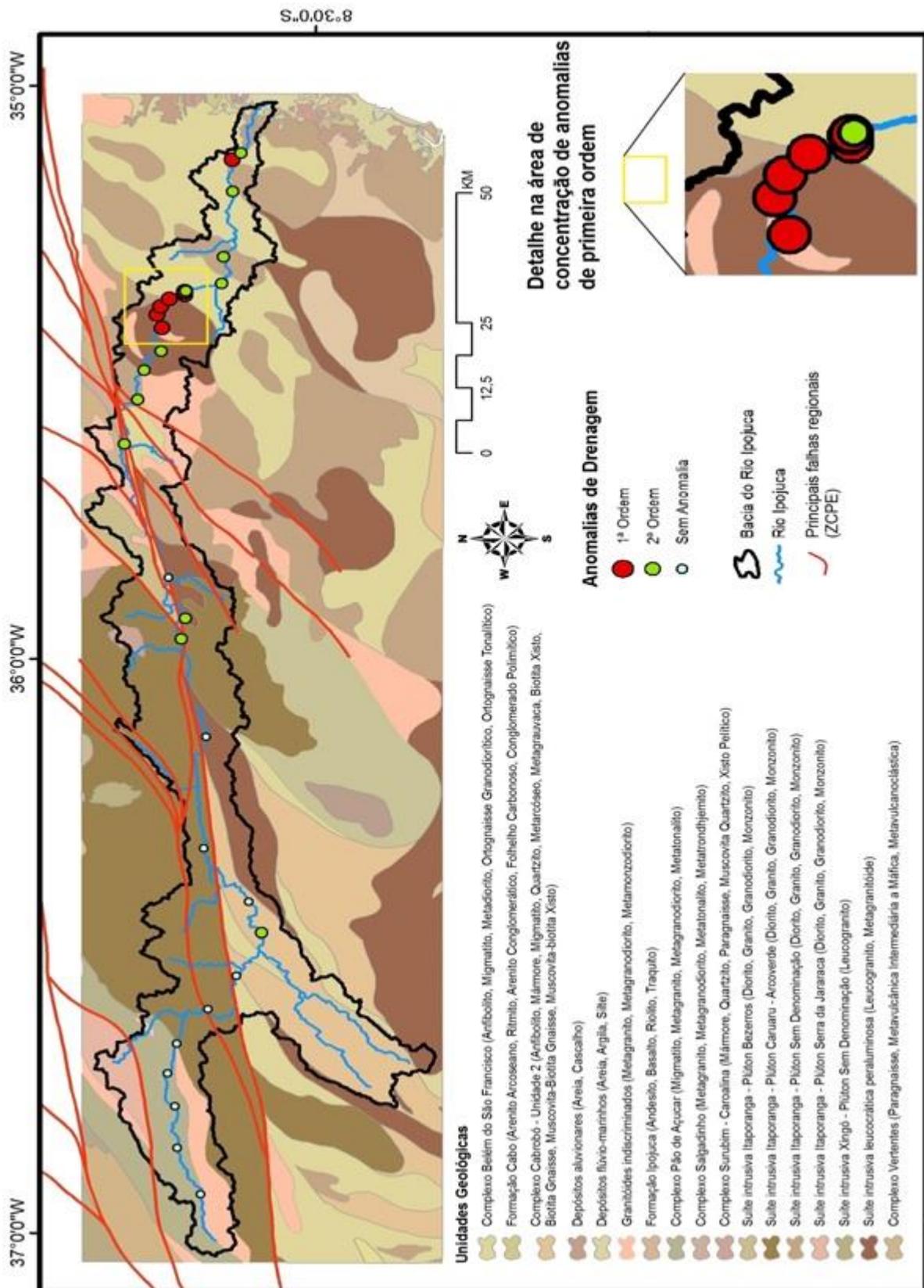


Figura 5. Mapa geológico com a distribuição das anomalias da drenagem sobre as unidades litológicas.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A aplicação do IH à bacia do rio Ipojuca, e o controle posterior dos dados morfométricos obtidos pelas evidências de

campo, demonstrou que o método pode ser aplicado com vistas a definir de forma mais adequada, e quantificada, a ocorrência de

rupturas de gradiente de caráter local e regional. A escolha da bacia em questão deu-se em virtude da mesma cortar diversas morfoestruturas do Nordeste oriental, cujos limites geográficos restam ainda pouco claros com base na literatura vigente. Desta forma, a identificação das anomalias de primeira ordem permitiu localizar de maneira mais efetiva os principais elementos estruturais que definem os limites entre compartimentos de relevo em uma

escala compatível à equidistância de 25 metros. Esta metodologia mostra-se então de grande valia para a macromodelimitação das unidades geomorfológicas regionais, sobretudo o Planalto da Borborema que, em face das diversas abordagens adotadas em sua análise, carece de parâmetros mais precisos para sua identificação espacial com fins prioritariamente geomorfológicos.

REFERÊNCIAS

1. ALMEIDA, F. F. M., BRITO NEVES, B. B., CARNEIRO, C. D. R. The origin and evolution of the South American Platform. *Earth-Science Reviews*. 50, 77-111. 2000
2. BEZERRA, F. H. R., BRITO NEVES, B. B.; CORRÊA, A. C. B., BARRETO, A. M. F., SUGUIO, K. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin - The Cariata trough, northeastern Brazil. *Geomorphology*, v.97.p.555-582. 2008.
3. BEZERRA, F. H. R.; NASCIMENTO, A. F.; FERREIRA, J. M.; NOGUEIRA, F. C.; FUCK, R. A.; BRITO NEVES, B. B.; SOUSA, M. O. L. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America — Integration of seismological and paleoseismological data. *Tectonophysics*, v.510. p.269-290. 2011.
4. BIGARELLA, J. J. *et al.* Estrutura e Origem das Paisagens Tropicais e Subtropicais. Volume 3. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina. 2003.
5. BRIERLEY, G. J., & FRYIRS, K. Tributary-trunk stream relations in a cut-and-fill landscape: a case study from Wolumla catchment, N.S.W., Australia. *Geomorphology*, 28, 61–73. 1999.
6. BRITO NEVES, B. B.; VAN SCHMUS, W. R.; FETTER, A. H. Noroeste da África – Nordeste do Brasil (Província Borborema) Ensaio comparativo e problemas de correlação. *Geo. USP Sér. Cient.*, São Paulo, v.1, p.59-78. 2001a
7. BRITO NEVES, B. B., CAMPOS NETO, M.C., VAN SCHMUS, W.R., SANTOS, E.J. O sistema Pajeú-Parafba e o maciço São José do Campestre no leste da Borborema. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31. p. 1-15. 2001b.
8. BRITO NEVES, B. B., CAMPOS NETO, M.C., VAN SCHMUS, W.R., FERNANDES, T.M.G., SOUZA, S. O terreno alto Moxotó no leste da Parafba (maciço Caldas Brandão). *Revista Brasileira de Geociências*, v. 31. p.16-31. 2001c.
9. CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. *Notícias Geomorfológicas*. 9(18), p. 35-64. 1969
10. CHRISTOFOLETTI, A. - *Geomorfologia*. São Paulo: Editora Edgar Blücher. 2ª edição, 188p. 1980.
11. CORREA, A. C. B.; TAVARES B. A. C. MONTEIRO, K. A. CAVALCANTI, L. C. S. LIRA, D. R. Megageomorfologia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo. 2010.
12. DAVIS, W. M. The Geographical cycle. *Geographical journal*. v. 14, p. 481-504. 1899.
13. ETCHEBEHERE, M. L. C. Terraços neoquaternários no vale do Rio do Peixe, Planalto Ocidental Paulista: implicações estratigráficas e tectônicas. Rio Claro. 2 v. Tese (Doutorado em Geociências) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista. 2000.
14. ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; FULFARO, V. J.; PERINOTTO, J. A. J. Aplicação do índice "Relação Declividade-Extensão - RDE" na Bacia do Rio do Peixe (SP) para detecção de deformações neogênicas. *Revista do Instituto de Geociências - USP*, v. 4, n. 2, p. 43-56. 2004.
15. ETCHEBEHERE, M. L. C.; SAAD, A. R.; SANTONI, G.; CASADO, F. C.; FULFARO, V. C. Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do Rio do Peixe, região ocidental Paulista, mediante aplicação de índices RDE (Relação Declividade-Extensão) em segmentos de drenagem. São Paulo. UNESP. *Revista Geociências*, v 25, n. 3, p. 271-287. 2006.
16. FERREIRA, J.M., BEZERRA, F.H.R., SOUZA, M.O.L., do NASCIMENTO, A.F., MARTINS SÁ, J., FRANÇA, G.S. The role of precambrian mylonitic present day stress field in the coseismic reactivation of the Pernambuco Lineament, Brazil. *Tectonophysics*. 456:11-126. 2008.
17. GURGEL, S. P. P.; BEZERRA, F. H. R.; CORRÊA, A. C. B.; MARQUES, F. O.; MAIA, R. P. Cenozoic uplift and erosion of structural landforms in NE Brazil. *Geomorphology (Amsterdam)*, v 186, p. 68. 2013
18. HACK, J. T.. Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. U.S. Geological Survey Professional Paper 294-B: 45–97. 1957.
19. HACK, J. T. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal of Research of the U.S. Geological Survey* v. 1, n. 4: 421–429. 1973.
20. HACK J. T. Dynamic equilibrium and landscape evolution. In *Theories of Landform Development*, Melhorn WL, Flemal RC (eds). State University of New York Press: Binghamton, NY: 87–102. 1975.
21. HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society of America Bulletin*, v 56, p. 275-370. 1945.
22. LOPES, A.E.V., ASSUMPTÃO, M., NASCIMENTO, A.F., FERREIRA, J.M., MENEZES, E.A.S., BARBOSA, J.R. Intraplate earthquake swarm in Belo Jardim, NE Brazil: reactivation of a major Neoproterozoic shear zone (Pernambuco Lineament), *Geophysic. J. Int.* 180, p. 1303-1312. 2010.
23. MAGNAVITA, L. P. Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift, NE Brazil. Tese (Doutorado). University of Oxford. 492p. 1992.
24. MARTINEZ, M. Aplicação de parâmetros morfométricos de drenagem na bacia do Rio Pirapó: o perfil longitudinal. Dissertação (mestrado). Maringá, 2005.
25. McKEOWN, F. A.; JONES-CECIL, M.; ASKEW, B. L.; McGRATH, M. B.. Analysis of stream-profile data and inferred tectonic activity, Eastern Ozark Mountains region. U. S. Geological Survey Bulletin, n. 1807, p. 1-39, 1988.
26. MELO, S. C. Estrutura, petrologia e geocronologia do batólito Brejo da Madre de Deus (estado de Pernambuco), relações com a zona de cisalhamento Pernambuco leste, Nordeste do Brasil. Tese de Doutorado, Centro de Tecnologia e

- Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, 118 p. 2002.
28. MISSURA, R. Análise mosfoestratigráfica da bacia do Ribeirão dos Poncianos - MG. Dissertação (Mestrado em Geografia Física) - Programa de pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro. 2005.
27. MONTEIRO, K.A. Superfícies de Aplainamento e Morfogênese da Bacia do Rio Tracunhaem, Pernambuco. Dissertação de Mestrado. Recife, UFPE. 124pg. 2010.
28. OLIVEIRA, R. G; MEDEIROS, W.E. Evidences of buried loads in the base of the crust of Borborema Plateau (NE Brazil) from Bouguer admittance estimates. Journal of South American Earth Sciences. V. 37, p. 60-76, 2012.
29. SEEBER, L. GORNITZ, V. River Profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. Tectonophysics, v. 92, p. 335-367, 1983.
30. SHREVE, R. L. Statistical law of stream numbers, Journal of Geology, v 74, p. 17-37. 1966.
31. SOUSA, M. O. L.; BEZERRA, F. H. R.; FERREIRA, J. M.; DO NASCIMENTO, A. F.; FUCK, R. A.; SÁ, J. M.; MACIEL, I. B. Evidências estruturais da reativação do Lineamento Pernambuco- PE. XLVI Congresso Brasileiro de Geologia. 2012.
32. SOUZA, J. O. P. Modelos de evolução da dinâmica fluvial em ambiente semiárido – bacia do açude do saco, Serra Talhada, Pernambuco – Recife. 189 f. 2014.
33. STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. Geological Society of America Bulletin 63, 1117-1142. 1952.
34. TROIANI, F.; DELLA SETA, M. The use o the Stream Length-Gradient index in morphotectonic analysis of small catchments: a case study from Central Italy. Geomorphology 102. 159-168. 2008.

Manuscrito recebido em: 13 de Maio de 2014

Revisado e Aceito em: 18 de Setembro de 2014