Revista da ANPEGE. v. 17. nº. 33, p. 271 - 295, ANO 2021. e-ISSN: 1679-768X
https://ojs.ufgd.edu.br/index.php/anpege. // DOI 10.5418 / ra2021.v17i33.12108

ANÁLISE GEOMORFOLÓGICA COMO INSUMO PARA GESTÃO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS: O caso das inundações em Grijalva-Villahermosa, México

GEOMORPHOLOGICAL ANALYSIS AS AN INPUT FOR WATERSHED MANAGEMENT: The case of flooding in Grijalva-Villahermosa, México

ANÁLISIS GEOMORFOLÓGICO COMO ENTRADA PARA EL MANEJO DE CUENCA HIDROGRÁFICA: El caso de inundaciones en Grijalva-Villahermosa, México

Isabela Habib Canaan da Silva | Telma Mendes da Silva | Renato Miranda Ribeiro de Almeida

RESUMO

O presente estudo apresenta uma contribuição para avaliação da susceptibilidade de bacias hidrográficas à ocorrência de inundações, a partir da análise de aspectos geomorfológicos. A área de estudo corresponde à bacia Grijalva-Villahermosa, situada no entorno da cidade de Villahermosa, México, onde há ocorrência de inundações periódicas. Foram utilizados dados de altimetria e hidrografia para a construção do MDT, a partir do qual foi delimitada a bacia e realizada a compartimentação geomorfológica e a análise morfométrica. Posteriormente, foi efetuada a integração dos resultados para a confecção do mapa de susceptibilidade a inundações. De acordo com a compartimentação geomorfológica mais da metade da área mapeada (55%) corresponde a locais onde há possibilidade de eventos de inundação, que foram corroborados pelas análises morfométricas e permitiram à definição de áreas mais susceptíveis. Por fim, o mapa de susceptibilidade foi analisado juntamente com a delimitação de áreas urbanas apontando locais de risco a população.

Palavras-chave: Análise morfométrica, Baciashidrográficas; Inundação, Sistema de informação geográfica.

ABSTRACT

This paper presents a proposal for the evaluation of watersheds flood susceptibility, based on geomorphological analysis. The study area corresponds to the Grijalva-Villahermosa watershed, located in the vicinity of the city Villahermosa, Mexico, where periodic flooding occurs. Altimetric and hydrographic data were used for DTM construction and watershed delimitation. Analytical procedures were carried out, allowing geomorphological compartmentalization and morphometric analysis. Subsequently, the results were integrated to create the susceptibility map to floods. According to the geomorphological compartmentalization more than half of the mapped area (55%) corresponds to places where there is a possibility of flooding events, which were corroborated by morphometric analyzes and allowed the definition of more susceptible areas. Finally, the susceptibility map was analyzed together with the delimitation of urban areas, pointing out places of risk to the population.

Keywords: Morphometric Analysis; Whatersheds; Flooding; Geographic information system.

RESUMEN

El artículo presenta una contribución para evaluar La susceptibilidad de lãs cuencas hidrográficas a La ocurrencia de inundaciones, basada preferiblemente em el análisis de aspectos geomorfológicos. El área de estudio corresponde a La cuenca Grijalva-Villahermosa, ubicada alrededor de la ciudad de Villahermosa, México, donde se produce inundaciones periódicas. Se utilizaron datos de altimetría e hidrografía para construir el MDT, a partir Del cual se delimito La cuenca y se realizaron los análisis relacionadas con la compartimentación geomorfológica y el análisis morfométrico. Posteriormente, los resultados se integraron para crear el mapa de susceptibilidad a las inundaciones. Según la compartimentación geomorfológica, más de la mitad del área mapeada (55%) corresponde a lugares donde existe la posibilidad de eventos de inundación, que fueron corroborados por análisis morfométricos y permitieron la definición de áreas más susceptibles. Finalmente, se discutió el mapa de susceptibilidad con la delimitación de áreas urbanas señalando el riesgo de la población local.

Palabras clave: Análisis morfométrico; Cuencas hidrográficas; Inundaciones, sistema de información geográfica.

Introdução

Nas últimas décadas verifica-se um aumento considerável na frequência e intensidade de inundações e, consequentemente, dos prejuízos causados por estes desastres naturais. Eventos de cheias em cursos fluviais ocorrem normalmente por fatores naturais como chuvas intensas, mas as intervenções geradas pelas atividades humanas acabam agravando este fenômeno, gerando graves inundações. Tal fato está atrelado à ocupação urbana na área de ocorrência de feições morfológicas horizontais a sub-horizontais de planícies quaternárias e, ainda, a impermeabilização de solos pelas construções desenfreadas e sem drenagem adequada. Deste modo, torna-se importante a compreensão da dinâmica físico-ambiental de uma bacia hidrográfica, de forma a contribuir para a formulação de planos e políticas de uso e manejo adequado do solo, além de balizar práticas emergenciais voltadas para amenizar o risco de inundações.

Mapear áreas inundáveis é, portanto, de extrema importância para o direcionamento das expansões urbanas (FIGUEIREDO, 2003). Este tipo de mapeamento pode subsidiar tanto a reorganização do espaço urbano, uma vez que são úteis para o estabelecimento de novas diretrizes de ocupação em uma cidade (OLIVEIRA*et al*., 2010), quanto à elaboração de um zoneamento ambiental que visa o reconhecimento das especificidades e distinção de áreas e seus respectivos usos adequados.

A bacia do rio Grijalva-Villahermosa (Tabasco, México), selecionada para o presente estudo, possui uma área de cerca de 60% representada por planície flúvio-marinha quaternária, com presença de lagoas e pântanos (PINEDA & SÁNCHEZ, 2009). O Estado de Tabasco possui uma das mais complexas redes hidrográficas do México, sendo o trecho localizado a jusante da bacia Grijalva-Villahermosa caracterizada pela maior pluviosidade registrada no país, média de 4.500 mm ao ano, sendo a média oficial do país de 2.147 mm, de acordo com o Diário Oficial da Federação (2010). Isso contribui para que problemas relacionados a eventos de extravasamento dos canais fluviais sejam recorrentes, causando inundações significativas que refletem o elevado volume de água convergente para as planícies rebaixadas com lento processo de infiltração, afetando diretamente a cidade de Villahermosa.

Segundo relatos de Sánchez (2011), já no século XVIII, as fortes chuvas provocavam alagamentos em Villahermosa e comprometiam a produção agrícola de Tabasco. Em 1904, a construção de um canal de navegação agravou ainda mais o problema das inundações. Além disso, nos últimos 50 anos, foram construídas quatro represas ao longo do Rio Grijalva que influenciaram diretamente a ocorrência de uma grande inundação ocorrida em 2007 (SANCHEZ,2011).

Ressalta-se que até os anos de 1920, a população de Tabasco era predominantemente rural. A partir da década de 1970, as atividades petrolíferas incrementaram o crescimento urbano e demográfico da área. Sánchez (2011) cita como efeitos da indústria do petróleo no Estado de Tabasco o crescimento do meio urbano e a migração de trabalhadores, com a consequente diminuição da produção de alimentos. Neste contexto, Villahermosa tornou-se cidade petroleira, concentrando a população de Tabasco e, na década de 1980, o governo do Estado de Tabasco comprou terras e promoveu um projeto habitacional urbano. Atualmente, a cidade de Villahermosa conta com todos os recursos e serviços de uma metrópole moderna.

Todo o processo de desmatamento e crescimento urbano provocou alterações nas condições ambientais, favorecendo a maior vulnerabilidade a fenômenos hidrometeorológicos extremos. Como exemplo, podem ser mencionadas as inundações que ocorreram em 1980, 1995, 1999, 2007 e 2010.

A escolha da referida bacia para estudo decorre de uma demanda ocorrida no desenvolvimento do projeto de cooperação internacional entre Brasil e México realizado pelo Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ) para a petroleira Petróleos Mexicanos (PEMEX). Além disso, a área, imageada pelos satélites RADARSAT-1 e 2, teve monitoramento das

atividades de exploração e produção de petróleo na Baía de Campeche (porção sul do Golfo do México) durante o período de 2000 até 2012, pelo Laboratório de Sensoriamento Remoto por Radar Aplicado a Indústria do Petróleo (LabSAR), que corresponde a uma parceria acadêmica entre a COPPE/UFRJ e a PETROBRAS.

Trata-se de uma área de extrema importância para o México, uma vez que a atividade petrolífera é intensa e com grande concentração de instalações industriais. E, portanto, o fenômeno de inundação afeta as operações da estatal mexicana PEMEX, comprometendo diretamente seu desempenho industrial.

Sendo assim, o objetivo do presente estudo é analisar e integrar aspectos geomorfológicos como subsídioà identificação de áreas sujeitas a inundações, contribuindo para avaliação da susceptibilidade ao desenvolvimento de inundações em bacias hidrográficas. Este trabalho procurou demonstrar que a análise de aspectos geomorfológicos de uma bacia hidrográfica é um insumo fundamental para o entendimento da dinâmica físico-ambiental, bem como subsidia à identificação de distintas condições do terreno que podem indicar: 1) áreas propícias à ocorrência de inundações; 2) áreas susceptíveisà deposição sedimentar ao longo dos eixos de drenagem e/ou em áreas de extravasamento do canal, e 3) áreas de produção de água e sedimentos.

Área de estudo

A Região HidrológicaGrijalva-Usumacinta, localizada no sudeste mexicano, consiste da união de duas grandes bacias hidrográficas binacionais: bacia do Rio Grijalva e bacia do Rio Usumacinta (Figura 1), conforme a Comissão Nacional da Água - Secretaria do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais do México. Em sua área central localiza-se a cidade de Villahermosa, capital do estado de Tabasco, e uma das principais cidades da região sudeste do estado mexicano e que apresenta em seu histórico inúmeros eventos de inundações. Esta unidade federativa encontra-se ao sul do Golfo do México, limitando-se a leste com o estado de Campeche e com a República da Guatemala, a oeste com o estado de Veracruz, a sul com o estado de Chiapas e a norte com o golfo do México (Figura 1).

Por abranger uma área bastante extensa para ser estudada, que inclui limites internacionais, optou-se por limitar o trabalho na sub-bacia Bajo Grijalva, também chamada de bacia Grijalva-Villahermosa, que corresponde a 25% do total da Região Hidrológica número 30 (Figura 1).

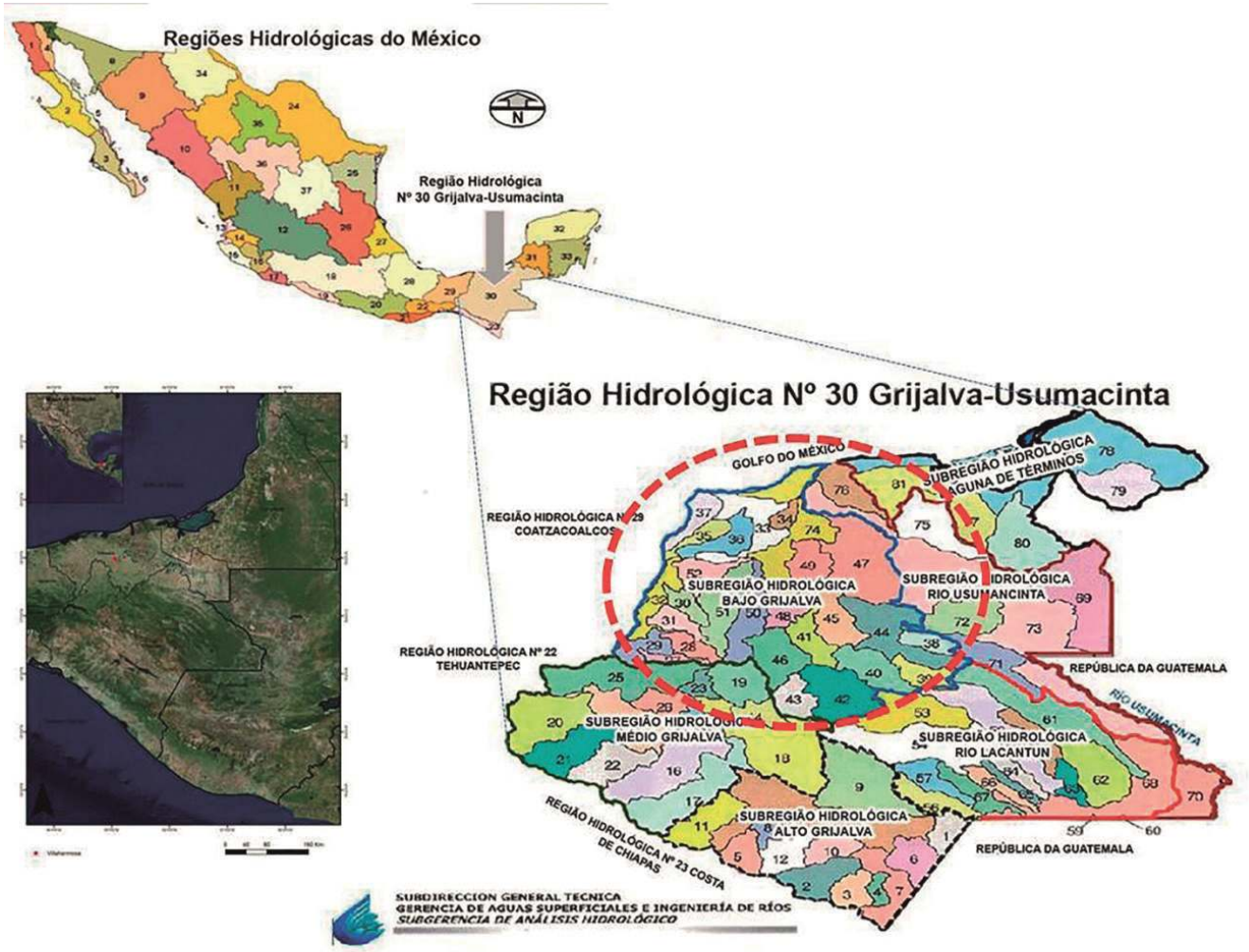

Figura 1 - Localização no território mexicano da Região Hidrológica n° 30 e identificação de suas sub-bacias, em destaque a sub-região hidrológica Bajo Grijalva.

Adaptado de: Diário Oficial de La Federación (2010).

O estado de Tabasco se situa em terrenos formados, predominantemente, por sedimentos quaternários que compõem a extensa planície costeira e pantanosa do sul do Golfo do México, embasados por rochas ígneas e metamórficas (CASTILLO *et al*., 2008) (Figura 2). Em razão da abundância de rochas areníticas e sedimentos quaternários, a área apresenta permeabilidade média a alta, contribuindo para ocorrência de uma das maiores reservas de água subterrânea do país. Mais ao sul, nos limites com os estados de Tabasco e Chiapas, existem afloramentos cretáceos com destaque para rochas calcárias (SÁNCHEZ, 2011). Essas rochas são amplamente utilizadas na indústria de construção civil, além de se constituírem em bons reservatórios de hidrocarbonetos, cuja extração representa a principal atividade da região, sendo Campeche e Tabasco grandes produtores de óleo cru.

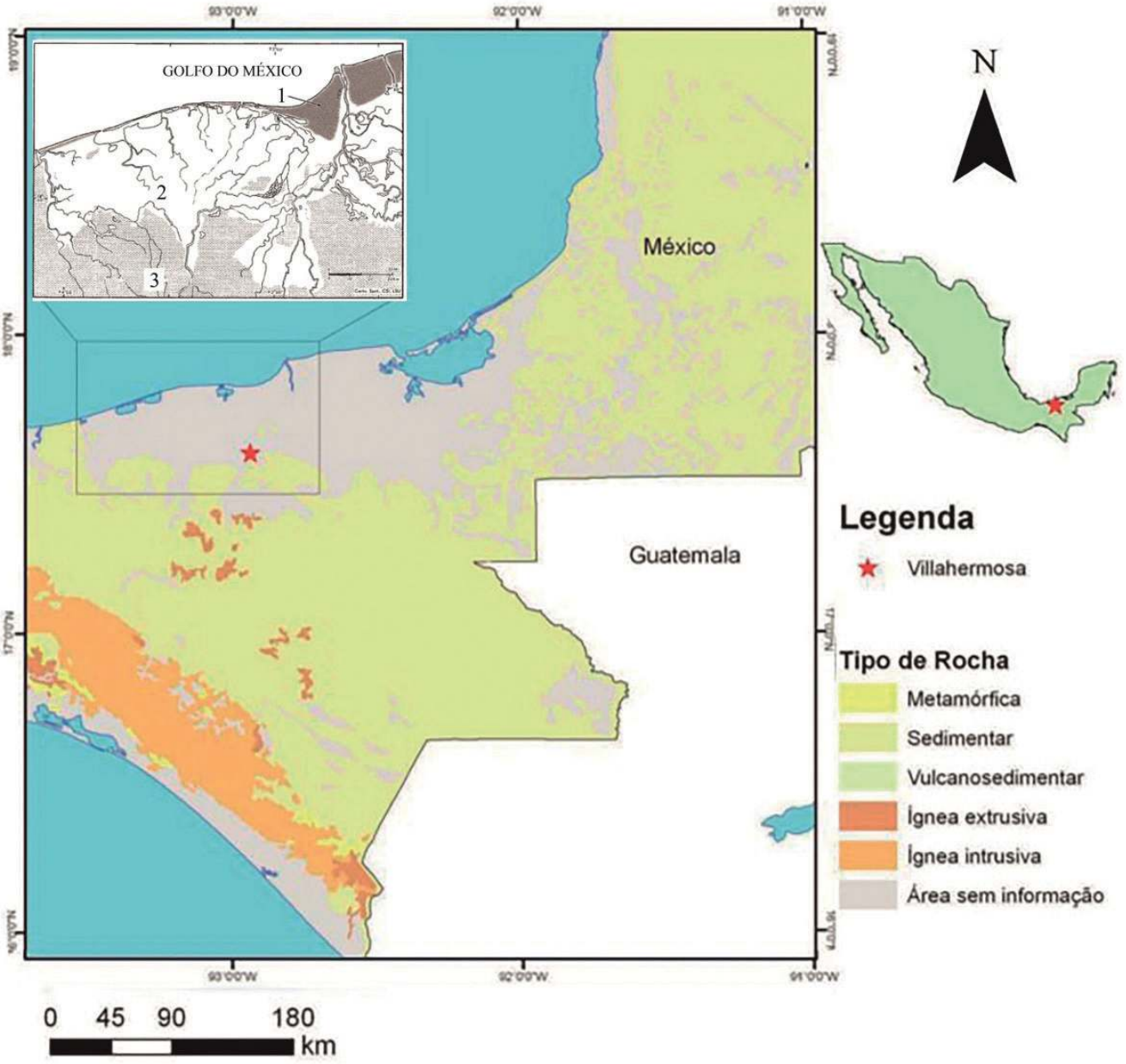

Figura 2 -Unidades litológicas do Estado de Tabasco e regiões adjacentes. Em complementação é apresentado em detalhe o mapeamento morfológico de Thom (1967): 1 - dunas e "beachrocks"; 2 -planícies fluviais atuais e 3 - terraços fluviais pleistocênicos e colinas.

Fonte: Elaboração própria.

Sánchez (2011) define três sistemas morfogênicos em Tabasco: terraços fluviais de origem pleistocênica, planícies aluviais e planícies costeiras, onde se formam deltas. No delta do rio Grijalva com o rio Usumacinta há o predomínio de dunas arenosas contíguas ao domínio da planície fluvial recente, caracterizando o relevo predominantemente plano, com a parte relativamente mais elevada situada a sul de Villahermosa, conforme mapeamento geomorfológico realizado por Thom (1967). Encontram-se ainda amplos vales, resultantes da acumulação de depósitos fluviais, além de extensas planícies de inundação.

A evolução geológico-geomorfológicaestá associada a eventos tectônicos de idade Mesozoico-Cenozoico de abrangência regional. Essas unidades morfológicas foram retrabalhadas ao longo do Quaternário, configurando a paisagem atual (CASTILLO *et al*., 2008). Nesta área, são encontrados vales fluviais de orientação NW-SE, bastante alongados como os localizados na fronteira com a República da Guatemala. A fronteira entre os Estados

de Tabasco e Chiapas é marcada por uma mudança abrupta de planícies para serras, com cristas pontiagudas, e mesma orientação NW-SE, dissecadas perpendicularmente pela drenagem atual formando pequenos vales.

A topografia, de desnível altimétrico inferior a quarenta metros, proporciona à área uma suavidade de escoamento das águas em direção às planícies e é responsável pela existência de uma extensa área pantanosa, com inúmeros rios meandrantes e trechos abandonados. A sazonalidade de alagamento das áreas pantanosas possibilita a ligação entre os lagos durante a estação chuvosa (THOM, 1967).

A bacia hidrográfica possui um abastecimento pluviométrico anual bastante elevado, tendo média de 2.060 mm e podendo alcançar 4.500 mm. Nas proximidades das áreas montanhosas, a estação chuvosa para a sub-região do Alto Grijalvaé de maio a outubro, enquanto para o Baixo Grijalva, de junho a janeiro e na sub-região de Coatzacoalcos de maio a dezembro (SÁNCHEZ, 2011). Isso mostra um panorama da distribuição espacial e sazonal da pluviosidade na bacia, mas que já é bem suprida ao longo de todo o ano.

Estes aspectos demonstram condições físico-ambientais de favorecimento natural a inundações dos terrenos rebaixados da bacia. Sendo, portanto, de interesse para as políticas de gestão o conhecimento da dinâmica das sub-bacias responsáveis pelo maior aporte de água e materiais para as áreas inundáveis, e que serão aqui indicadas pela análise e avaliação de aspectos geomorfológicos.

Procedimentos metodológicos

Foram disponibilizadas pela *Comisión Nacional Del Agua* (CONAGUA) as bases hidrográficas (1:250.000 e 1:50.000) e de altimetria (1:25.000) em formato *shapefile* do México e da Guatemala. Por se tratarem de dados distintos, foram necessários alguns ajustes topológicos e de referencial para serem unificados. Tais bases serviram ainda como insumos para a construção do Modelo Digital de Terreno -MDT.

Para o processamento dos dados de curvas de nível e rede de drenagem foram utilizados os programas ArcGIS 9.3 e 10.0 e PCI Geomática 10.2, disponíveis no Laboratório de Sensoriamento Remoto por Radar Aplicado à Indústria do Petróleo (LabSAR– COPPE/UFRJ), na geração do Modelo Digital de Terreno (MDT) da área por meio de interpolação de curvas de nível e da rede de drenagem, com resolução espacial de 10 m.

De acordo com Renno& Soares (2001), a discretização espacial baseada em curvas de nível possibilita um melhor entendimento da conformação do terreno e, portanto, subsidia apreender a dinâmica dos processos hidrológicos em bacias hidrográficas. Sendo esta representação mais adequada que grades regulares de Modelos Digitais de Elevação (MDE), os quais podem mascarar certas feições do terreno.

Barros (2006) ressalta, ainda, que o MDE representa a superfície do terreno acrescida de quaisquer objetos existentes sobre ela e que, portanto, influenciam no valor da refletância do pixel; isto é, se existirem árvores e construções, a superfície representada refere-se ao topo das mesmas e não o valor altimétrico do terreno como são representados pelos MDTs, que representam a superfície real do terreno.

Por isso, optou-se por adotar e gerarum MDT próprio para este trabalho, pois para análises morfométricas de bacias hidrográficas este tipo de Modelo Numérico de Terreno (MNT) é mais adequado. E, também são melhores que os Modelos Digitais de Elevação (MDE) disponibilizados gratuitamente, como por exemplo, os produtos derivados do *Shuttle Radar TopographyMission* (SRTM) que representam a superfície do terreno e os objetos sobre a mesma. Como explica Grohmann (2008) para a geração dos MDE do SRTM os sinais de radar são refletidos, por exemplo, pelo dossel das árvores e não pelo terreno subjacente como já havia sido afirmado por Barros (2006).

Assim, esta base digital foi necessária para geração mais precisa de outros produtos geomorfológicos. Para a análise do relevo, foi adotado o próprio MDT, com 10 m de resolução.

Na figura 3A é apresentada uma visão geral da bacia Grijalva-Usumacinta, com a delimitação da bacia Grijalva-Villahermosa representada pela linha contínua em cor vermelha. O MDT foi processado de modo que seus produtos derivados fossem usados para uma delineação da bacia hidrográfica e das correspondentes sub-bacias, como também para a obtenção da compartimentação geomorfológica e dos atributos morfométricos.

Quanto ao mapeamento geomorfológico, o procedimento técnico utilizado foi fundamentado pelo método de compartimentação topográfica idealizado por Meis*et al*. (1982) e refinado por Silva (2002). E, para a melhor compreensão dos compartimentos da área de estudo, os intervalos das classes de relevo propostos por estes autores foram adaptados, bem como ajustadas as respectivas nomenclaturas das feições identificadas.

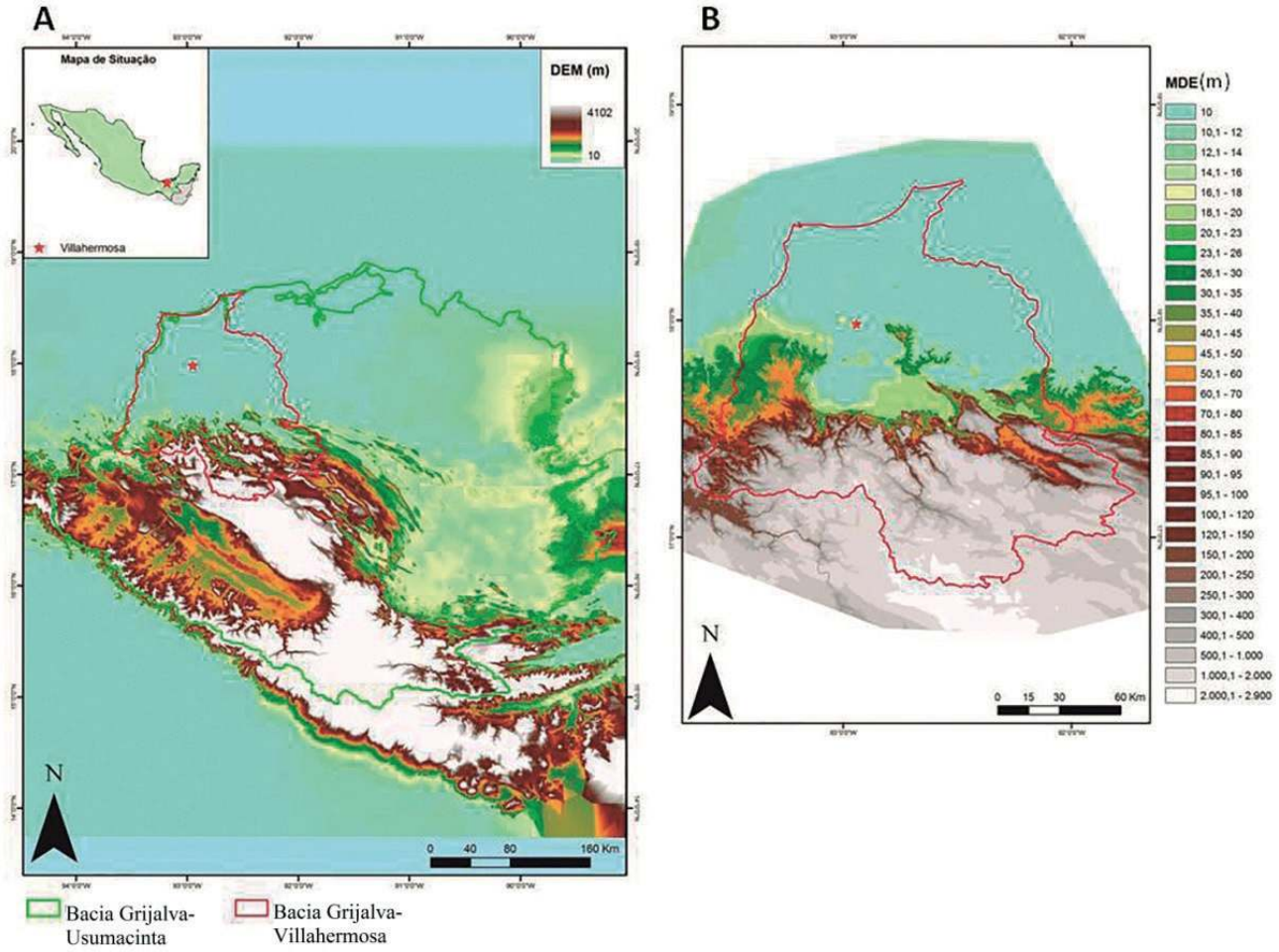

Figura 3 - Modelo Digital de Terreno (MDT), obtido a partir de hidrografia e das curvas de nível. A - visão geral da região da Bacia Grijalva-Usumacinta; B –Aproximação da bacia e localização da cidade de Villahermosa.

Fonte: Elaboração própria.

Esta metodologia consiste em calcular a amplitude altimétrica (Δh), dada pela diferença entre a cota altimétrica superior (Δhmáx.) e a inferior (Δhmín.) de bacias de drenagem de primeira e segunda ordem até sua confluência com a rede coletora. Para a hierarquização das bacias foi utilizado o ordenamento proposto por Strahler (1957), que define que a junção de dois segmentos de mesma ordem origina um segmento de ordem superior.

Para tanto, foram trabalhados em programa ArcGis10.0 os *shapefiles* com as curvas de nível e rede hidrográfica em escala 1:50.000, de modo a delimitar a área de deposição e inundação. Foram reconhecidas e delimitadas as curvas de nível de cota altimétrica mais baixa, seguindo a cota inferior de 10m e seu limite superior de 20m, correspondendo à área onde abaixo

desta cota altimétrica ocorre a deposição de materiais (carreados de porções mais a montante) e de prováveis inundações. Foi identificada também a área de sedimentação quaternária em trechos mais à montante pela presença de segmentos em que o afastamento entre as curvas de níveis se manteve bem distanciado, indicando que o processo de deposição prevalecia sobre o de erosão (SILVA *et al.*,2006). Para os demais compartimentos identificados foram utilizadas as informações de curvas de nível e de hidrografia para a delimitação das bacias de 1ª.e 2ª. ordens na escala de 1:250.000, haja vista o total areal da bacia em estudo.

Após esta etapa foram delineados diferentes polígonos, delimitados através do traçado de interflúvios e divisores das referidas bacias de drenagem, representando os compartimentos do relevo através do cálculo da amplitude topográfica (Δh = Δhmáx. - Δhmín.).

Devido à área de estudo apresentar valores altimétricos elevados, ocorrem bacias de drenagem de 1ª. e 2ª. ordem significantemente alongadas e o que correspondem aclasses de compartimentos geomorfológicos extremamente íngremes (Serras Escarpadas) e, portanto, sendo importante subdividi-las em distintas classes de amplitude altimétrica: 401-600m, 601-800m, 801-1000m, 1001-1200m, 1201-1400m, 1401-1600m, 1601-1800m e 1801-2000m. Esta subdivisão foi necessária por cada uma representar distinto potencial de dissecação das encostas, além de estarem associadas a áreas de maior contribuição de água e de sedimentos para as áreas mais rebaixadas localizadas à montante (Tabela 1).

Tabela 1 - Classes de amplitude altimétrica, compartimentos topográficos e características morfológicas correspondentes.

Classes de Amplitude Altimétrica	Compartimentos Topográficos	Características Morfológicas
0-10m	Área de Deposição Atual e Alagamento	Área de intensa acumulação da sedimentação atual e de alagamentos, onde processos deposicionais se sobrepõem aos erosivos
11-20m	Planícies Flúvio-Marinhas	Área de sedimentação quaternária com feições de topografia plana, horizontal a sub-horizontal.
21-100m	Colinas	Feições de topos suaves, caracterizadas pelo entulhamento de vales adjacentes e de reentrâncias das cabeceiras de drenagem
101-200m	Morros	Feições convexas com encostas íngremes e que ocorrem, muitas vezes, isoladas no meio de planícies flúvio-marinhas
201-400m	Serras de Transição ou Serras Isoladas	Feições morfológicas de transição entre compartimentos de diferentes graus de dissecação ou isoladas
401-600m	Serras Escarpadas (grau 1)	Feições elevadas com topos aguçados e encostas escarpadas, que possuem diferentes graus de dissecação. Apresentam, em sua maioria, uma mudança abrupta para os compartimentos mais rebaixados.
601-800m	Serras Escarpadas (grau 2)	
801-1000m	Serras Escarpadas (grau 3)	
1001-1200m	Serras Escarpadas (grau 4)	
1201-1400m	Serras Escarpadas (grau 5)	
1401-1600m	Serras Escarpadas (grau 6)	
1601-1800m	Serras Escarpadas (grau 7)	
1801-2000m	Serras Escarpadas (grau 8)	

Fonte: Elaboração própria.

A caracterização morfométrica da bacia contemplou três aspectos: relevo, geometria e propriedades da rede de drenagem. O limite da bacia Grijalva-Villahermosa foi definido com base no modelo digital de terreno (MDT) e sua comparação com o limite oficial da CONAGUA, queindicouconcordância, validando sua qualidade. O *shapefile* de limite da bacia foi trabalhado em projeção cartográfica cilíndrica equivalente visando à precisão da área e de produtos derivados.

A primeira etapa da análise morfométrica consistiu na caracterização do relevo da bacia, a partir do modelo digital de terreno, e teve como resultado o mapa de declividade extraído no programa ArcGIS através da ferramenta "*slope*" e elaborado de acordo com a classificação proposta pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 1979), sendo dividido em seis classes: 0,0 a 2,9% - plano; 3,0 a 7,9% - suavemente ondulado; 8,0 a 19,9% - ondulado; 20,0 a 44,9% - fortemente ondulado; 45,0 a 74,9% - montanhoso; e declividade superior a 75% - fortemente montanhoso. As informações de curvatura também foram extraídas no programa ArcGIS, através da ferramenta "*curvature*". Este parâmetro expressa a curvatura do terreno, que se apresenta com valores positivos e negativos: os valores negativos indicam terreno côncavo, o valor 0 árearetilínea e valores positivos terreno convexo.

A segunda etapa do processo de análise morfométrica consistiu na caracterização da morfometria das sub-bacias compreendidas na bacia Grijalva-Villahermosa (sub-região hidrológica Bajo-Grijalva - Figura 1) , através do cálculo da área de drenagem (A), perímetro da bacia de drenagem (P) e do índice de circularidade (Ic), calculado pela razão entre a área da bacia e a área de um círculo de mesmo perímetro. O valor máximo desta razão é 1, ou seja, quanto mais próximo a este valor, mais a forma da bacia se aproxima de um círculo Cardoso *et al*. (2006). Segundo Oliveira et al. (2007), a circularidade da bacia possui influência direta na distribuição do hidrograma de vazão no seu exutório. Isto ocorre porque, em um evento de chuva sobre toda bacia, aquelas que possuem formas alongadas apresentarão fluxos de água que atingem o exutório em um período de tempo maior, enquanto uma bacia que possui forma mais circular tende a ter resposta em seu exutório em menor intervalo de tempo, devido à disposição mais convergente de todos os canais afluentes que compõem a bacia.

A terceira etapa da análise, referente às propriedades da rede de drenagem, compreende o cálculo do comprimento total dos cursos d'água (L) e a densidade de drenagem (Dd). O comprimento total dos corpos d'água corresponde a soma de todos os corpos d'água que drenam a bacia, enquanto que a densidade de drenagem diz respeito à relação entre o comprimento total dos corpos d'água e a área da bacia. De acordo com Christofoletti (1969) *apud* Teodoro *et al*. (2007), valores menores que 7,5 km/ km^2 correspondem a baixa densidade de drenagem, entre 7,5 km/ km^2 e 10 km/ km^2 a média densidade e valores acima de 10 km/ km^2 a alta densidade. Assim, altos valores de densidade de drenagem indicam terreno bem drenado e com facilidade de escoamento.

A última etapa consistiu na caracterização do meio físico da bacia que se deu de maneira semi-qualitativa, adaptada a metodologia de Souza (2005), através da integração de seis parâmetros físicos: Índice de circularidade (Ic), compartimentação geomorfológica, textura do solo, Densidade de drenagem (Dd), amplitude topográfica (H) e curvatura do relevo. A unidade em superfície adotada foi a divisão de sub-bacias da bacia Grijalva-Villahermosa.

Foram calculados os valores de cada parâmetro listado anteriormente para as sub-bacias. Além da classificação textural do solo, disponibilizada pelo INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía) no formato nominal de grossa, média e fina. A denominação grossa é referente à predominância de sedimentos de areia grossa, enquanto média refere-se à predominância de sedimentos de areia média a fina e fina à predominância de sedimentos de silte e argila. Como cada parâmetro físico apresenta uma série de valores distintos, foi necessário dividir as séries em intervalos adequados. O passo seguinte constou na classificação de cada série de valores em função do seu grau relativo de suscetibilidade. Para a classificação final de cada sub-bacia foi atribuído um número de pontos para cada classe de susceptibilidade, sendo 1 para baixa, 2 para média e 3 para alta (Tabela 2).

Tabela 2 - Susceptibilidade (Suscep.) a inundações e suas respectivas pontuações para cada parâmetro: índice de Circularidade (Ic), Compartimentação Geomorfológica (Comp. Geo), Textura do Solo (Text. Solo), Densidade de drenagem (Dd), Amplitude Altimétrica (H) e Curvatura do Relevo (Curv. relevo).

Parâmetros físicos						Classificação	
Ic	Comp. Geo* (m)	Text. solo	Dd (km/km2)	H (m)	Curv. relevo	Pontuação	Suscep.
0 - 0,32	> 400	grossa	2,12 - 2,91	0 - 880	1	1	Baixa
0,33 - 0,65	101 – 200	média	1,33 - 2,11	881 - 1761	0	2	Média
0,66 - 1	0 – 20	fina	0,53 - 1,32	1762 - 2641	-1	3	Alta

** O parâmetro Comp.Geo refere-se à predominância em cada sub-bacia. Isto explica a ausência dos intervalos 21-100 e 201-400.*
Fonte: Elaboração própria.

Obtidas todas as pontuações individuais de cada parâmetro para cada sub-bacia, procedeu-se a somatória do número total de pontos para cada uma. Assim, o número mínimo de pontos obtidos foi de 6 e o máximo 18. A pontuação 6 e 7 corresponde a susceptibilidade muito baixa, 8 e 9 baixa, 10 a 14 corresponde a média, 15 e 16 a alta e 17 e 18 a muito alta. A metodologia de pontuação foi baseada no trabalho de Souza (2005) e o mapa final de susceptibilidade definiu os locais de risco para a população em ambiente SIG, a partir da junção aos polígonos de área urbana disponibilizados pelo INEGI. Este mapeamento é fundamental para ações de políticas de planejamento visto que o problema é recorrente na região.

Resultados e discussões

A área estudada corresponde a aproximadamente 25% do total da Região Hidrológica número 30 (Figura 1) e representa uma área de aproximadamente 23.000 km^2, segundo dados oficiais disponibilizados pelo governo mexicano.

Mais da metade da área mapeada, ou seja, 12.534,14 km^2 (55%), corresponde a trechos onde há acúmulo de deposição atual e de depósitos quaternários (Figura 4; Tabela 3). Tratam-se de locais onde processos de deposição prevalecem sobre os de erosão, os terrenos são mal drenados e estão, provavelmente, vinculados à ocorrência de eventos de inundação.

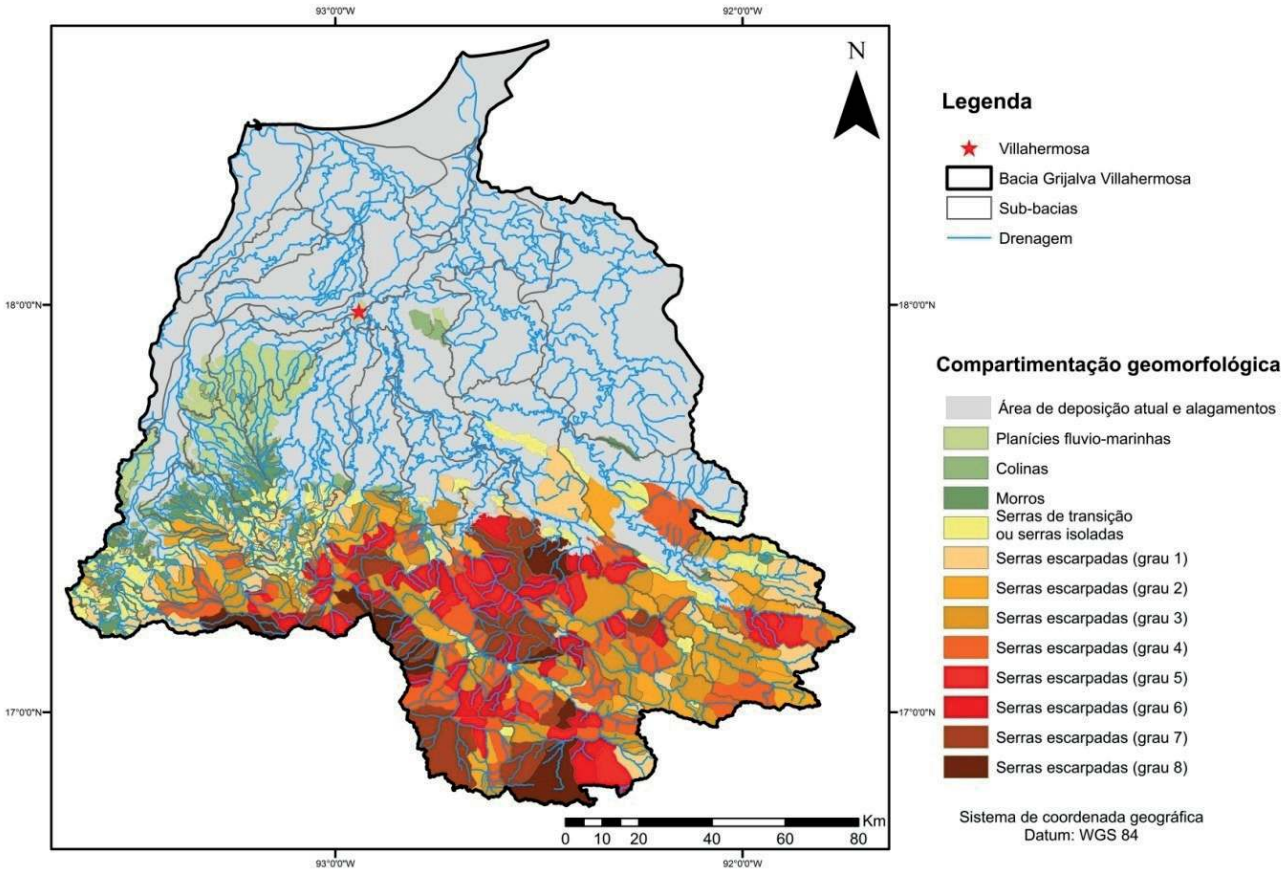

Figura 4 - Compartimentação geomorfológica da sub-região da RH 30, realizado em escala original 1:50.000.

Fonte: Elaboração própria.

Apesar da maior representatividade de áreas extremamente suaves correspondente a sedimentação quaternária flúvio-marinha, percebe-se a relevância de áreas no relevo caracterizadas por uma transição abrupta entre estas feições morfológicas e a morfologia de serras escarpadas. Essas áreas ocupam uma faixa contínua que se estende de leste para oeste de aproximadamente 30km de largura na porção centro-sul da bacia em análise (Figura 5). Essa característica corrobora com o histórico de inundações crescente da área. Isto ocorre porque com o intenso deslocamento e transporte de sedimentos das áreas mais dissecadas das classes de serras escarpadas (que variam de 1 a 8), para terrenos planos horizontais a sub-horizontais, os processos de assoreamento dos canais fluviais se intensificam, contribuindo diretamente para o desencadeamento de eventos de cheias e, as intensas inundações no entorno da cidade de VillaHermosa.

Tabela 3 -Percentuais areais em Km² e % dos compartimentos geomorfológicos da bacia Grijalva-Villahermosa.

Compartimento Topográfico	Amplitude Altimétrica (m)	Área (Km2)	% da bacia
Área de deposição atuale alagamento	0 - 10	11.622,569	51
Planícies flúvio-marinhas	11 - 20	911,574	4
Colinas	21 - 100	455,787	2
Morros	101 - 200	455,787	2
Serras Isoladas	201 - 400	911,574	4
Serras Escarpadas (grau 1)	401 -600	1.139,468	5
Serras Escarpadas (grau 2)	601 - 800	1.367,361	6
Serras Escarpadas (grau 3)	801 - 1000	1.367,361	6
Serras Escarpadas (grau 4)	1001 - 1200	1.367,361	6
Serras Escarpadas (grau 5)	1201 - 1400	911,574	4
Serras Escarpadas (grau 6)	1401 - 1600	683,681	3
Serras Escarpadas (grau 7)	1601 - 1800	911,574	4
Serras Escarpadas (grau 8)	1801 - 2000	683,681	3

Fonte: Elaboração própria.

A dinâmica hidrológica de cabeceiras de drenagem em áreas serranas é fundamental para uma primeira aproximação no entendimento das relações entre escoamento superficial, infiltração e recarga das zonas saturadas existentes na planície. Quanto maior a amplitude altimétrica do compartimento de serra escarpada, maior será o potencial em dissecar o terreno e, assim, maiores taxas de transporte de sedimentos até o canal fluvial principal e, consequentemente, ao nível mais rebaixado da bacia (Meis*et al*., 1982).

Dos 950 km da fronteira sul entre México, Guatemala e Belize, mais da metade (aproximadamente 550 quilômetros) estão dentro da bacia do Usumacinta (Figura 1). Ou seja, mesmo que grande parte desta bacia esteja na Guatemala, e não no México (Figura 1), a mesma é de fundamental importância para a compreensão da dinâmica das inundações na cidade de Villahermosa. Isso ocorre porque a parte mais baixa da bacia se encontra quase que totalmente em território mexicano e une-se com o rio Grijalva justamente no compartimento de planície. A esta característica da rede hidrográfica se associa o fato desta bacia estar localizada em uma das regiões com os mais elevados índices de precipitação de toda a meso América (DOF, 2010) e que, somado ao relevo contrastante, marcam um terreno extremamente susceptível ao desencadeamento de eventos extremos causadores de inundações.

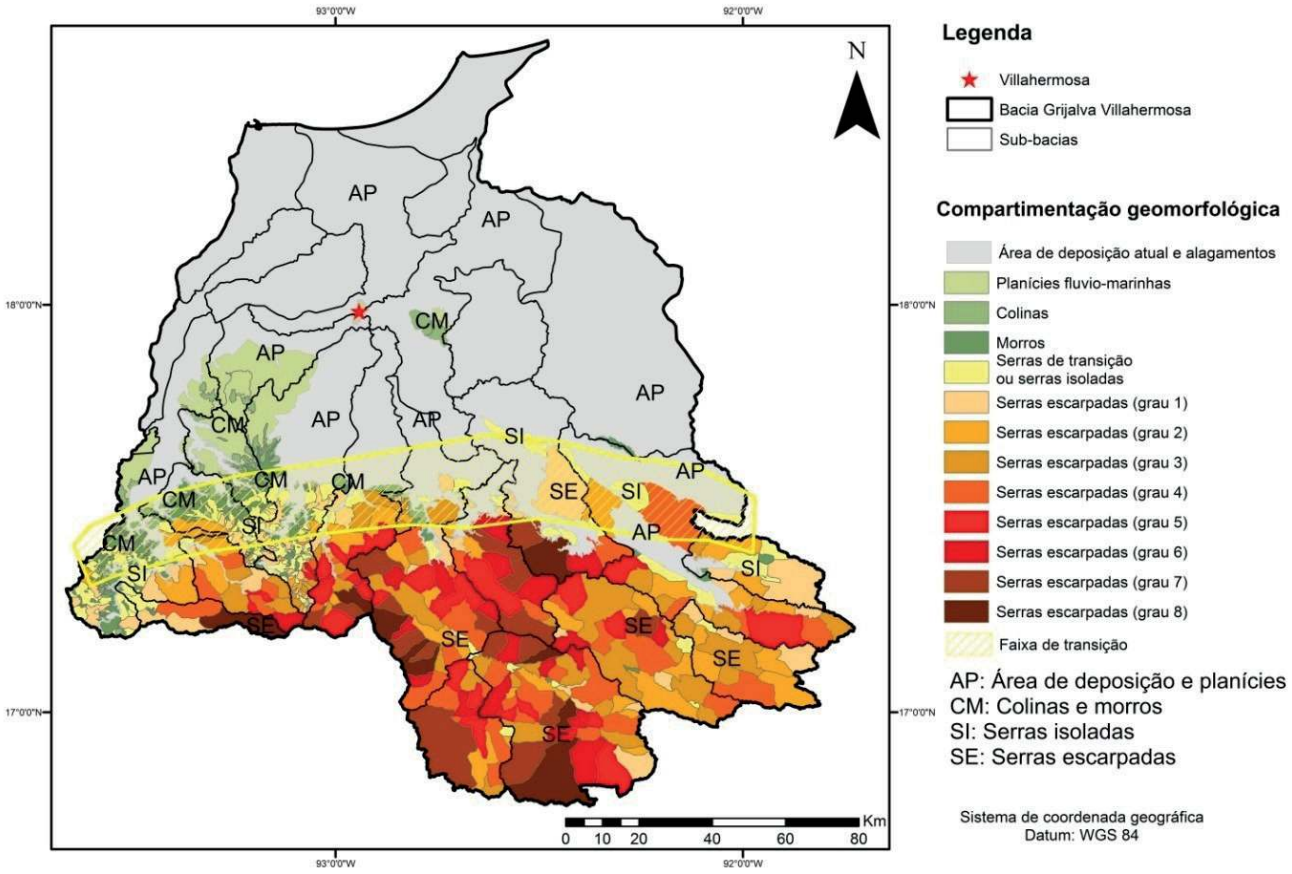

Figura 5. Mapageomorfológico com identificação da simbologia das feições morfológicas (AP, CM, SI e SE), com destaque para faixa de transição entre compartimentos de serras escarpadas e de planícies(em hachura com listras amarelas).

Fonte: Elaboração própria.

Para Lima (2008) os parâmetros morfométricos fazem com que se possa compreender o funcionamento de uma bacia hidrográfica. Assim, Através da análise morfométrica da bacia Grijalva-Villahermosa, e de suas sub-bacias, foram gerados mapas temáticos e cálculo areal dos parâmetros analisados que auxiliaram na caracterização e complementação dos padrões de relevo existentes.

Nardin e Robaina (2005) destacam que a análise da declividade representa relevância no estudo das potencialidades de utilização da área em que se relacionam aos tipos de uso e ocupação da terra. Os valores de declividade do relevo da bacia Grijalva-Villahermosa encontrados (Figura 6; Tabela 4) subsidiando o entendimento da velocidade dos fluxos d'água e, portanto, dos próprios fatores causais dos fenômenos de inundação. Os resultados apresentados, somados as informações extraídas do mapeamento geomorfológico, possibilitou observar que no entorno da cidade de Villahermosa predomina o relevo suave horizontal a sub-horizontal (correspondendo a mais de 50% da área da bacia), enquanto ao sul se apresenta ondulado e no extremo meridional montanhoso (Figura 6; Tabela 4). Esta distribuição espacial das feições morfológicas evidencia que o escoamento superficial é mais intenso ao sul, enquanto nos canais de drenagem situados no entorno da cidade de Villahermosa têm dificuldade de escoar, favorecendo à ocorrência de inundações.

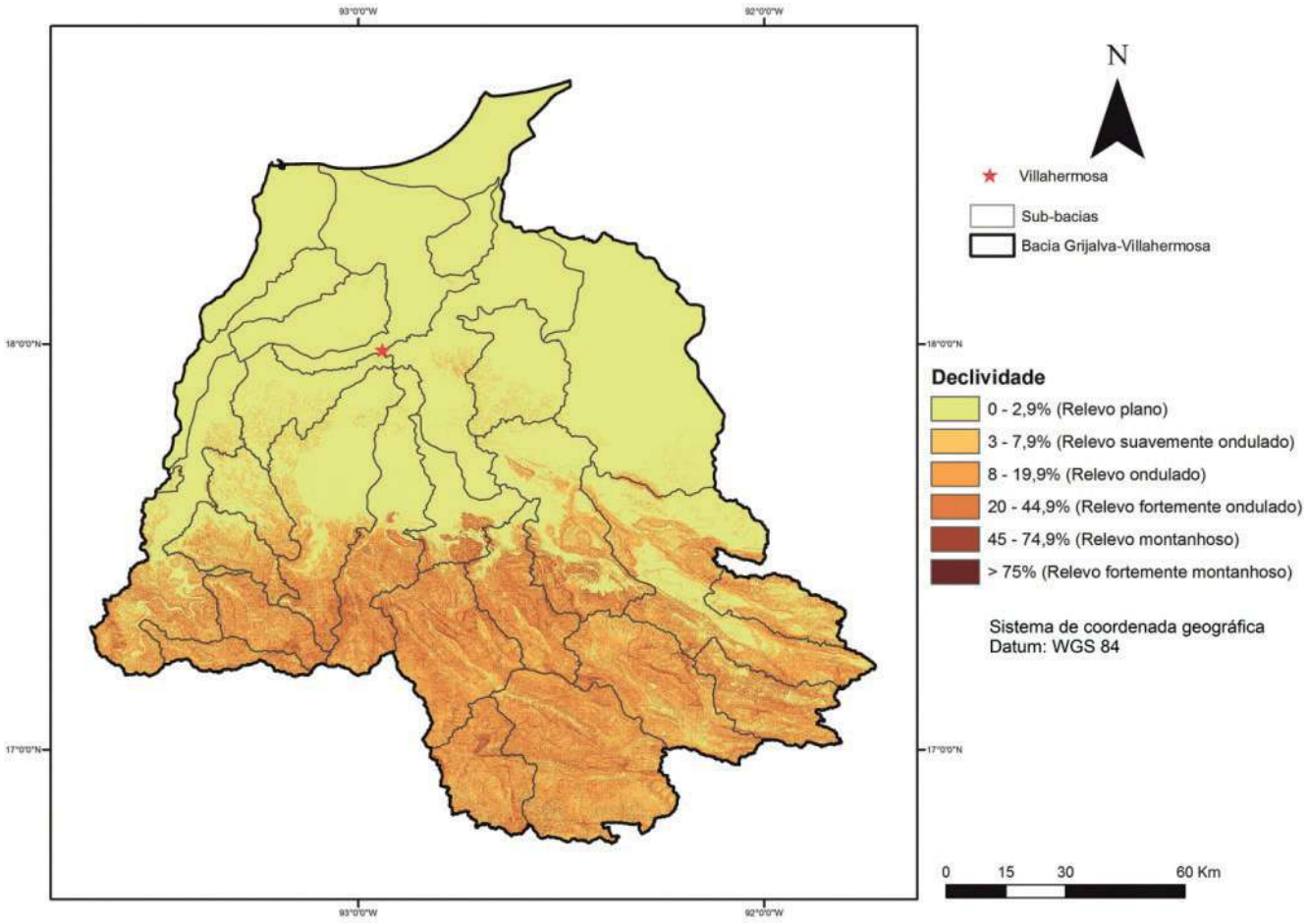

Figura 6 - Mapa de declividade do terreno de acordo com os parâmetros da EMBRAPA (1979).

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 4. Classes de declividade existentes na área de drenagem da bacia Grijalva-Villahermosa.

Classe de relevo	Declividade (%)	Área (km2)	% da bacia
Plano	0 – 2,9	13.217,82	58
Suavemente ondulado	3 – 7,9	2.278,94	10
Ondulado	8 – 19,9	3.646,30	16
Fortemente Ondulado	20 – 44, 9	3.190,51	14
Montanhoso	45 – 74,9	455,79	2
Fortemente Montanhoso	> 75	0	0

Fonte: Elaboração própria.

O parâmetro curvatura permitiu evidenciar a distribuição das áreas-fonte e das áreas de convergência de fluxos d'água e de materiais. Os segmentos de encosta convexos definem áreas de dispersão de água e sedimentos, segmentos côncavos definem trechos onde há convergência de água e sedimentos, enquanto segmentos retilíneos, quando localizados em declividades acentuadas, tendem a ser áreas de transporte para segmentos suaves e, quando localizados em declividades suaves, coincidem com feições de planícies onde tendem a concentrar água e os materiais transportados (TROEH, 1965).

Com base na figura 7 pode-se observar que no entorno da cidade de Villahermosa há o predomínio de segmentos retilíneos, feições de fundos de vales planos, que corresponde a

63% em superfície areal da bacia (Tabela 5). Enquanto na área de relevo ondulado e montanhoso, segmentos côncavos e convexos predominam, sugerindo que os fluxos d'água apresentam escoamentos rápidos e intensos até atingir áreas suaves e susceptíveis a ocorrência de inundações. Nas áreas de serras escarpadas as curvaturas côncava e convexa se alternam com muita proximidade, por isso para que sejam identificadas se faz necessário o uso de escala cartográfica de detalhe, como pode ser observado na figura 7.

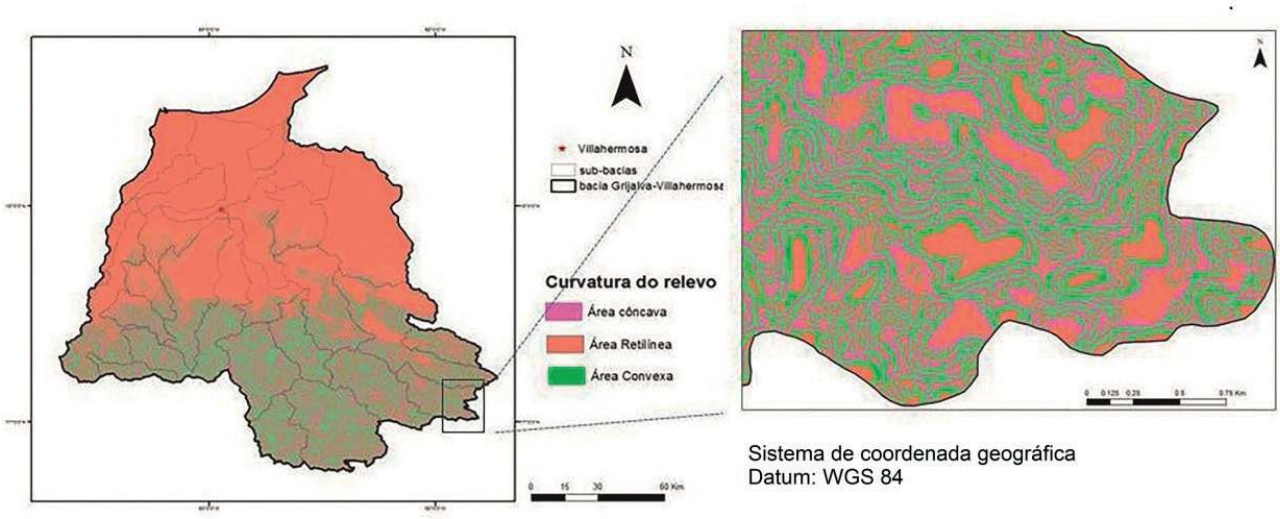

Figura 7. Mapa de curvatura do relevo da bacia Grijalva-Villahermosa.

Fonte: Elaboração própria.

Tabela 5. Classes de curvatura dos segmentos de encosta existentes na bacia Grijalva-Villahermosa.

Curvatura	Valores	Área (km2)	% da bacia
Área Côncava	-	4.329,98	19
Área Retilínea	0	14.357,29	63
Área Convexa	+	4.102,08	18

Fonte: Elaboração própria.

A etapa seguinte da caracterização morfométrica da bacia Grijalva-Villahermosa e de suas sub-bacias se deu com a definição da geometria e das propriedades da rede de drenagem.

Tonello (2005) indica que o cálculo de áreaé o elemento básico para os índicesmorfométricos e, assim, iniciou-se a caracterização da bacia em análise. A bacia Grijalva-Villahermosa apresenta uma área de drenagem de 22.789,35 km² e seu perímetro, comprimento da linha imaginária ao longo do divisor de águas, é de 973,11 km. Santos (2004) coloca que o perímetro serve como elemento para análise da dinâmica de uma bacia de drenagem, principalmente, no que tange a caracterização da forma e que pode descrever a bacia como sendo propicia ou não a enchentes.

O Índice de circularidade (Ic) atingiu o valor de 0,30 e como o valor desse índice se aproxima mais de 0 do que 1, estimasse que a bacia não tende ao formato circular e, sima uma disposição mais alongada, que desfavorece o escoamento dos fluxos d'água em curtos intervalos de tempo. Segundo Oliveira*et al.* (2007), a circularidade da bacia possui influência direta na distribuição do hidrograma de vazão no seu exutório.

Em relação ao comprimento total dos corpos d'água foi encontrado o valor de 31.412,64 km, com uma densidade de drenagem de 1,37 km/km². Segundo Christofoletti (1969) apud Teodoro *et al.* (2007) e França (1968), esse valor pode ser considerado de baixa densidade

de drenagem e indica terreno mal drenado; no entanto, deve-se levar em conta que há concentração de cabeceiras de drenagem nos altos cursos (compartimentos serranos) e, tal fato, acabou mascarando o valor de Ic encontrado. Fato este que pode ser corroborado pelo valor da amplitude topográfica calculada de 2.890m, um valor bastante elevado para a área da bacia. Sendo assim, índicesmorfométricos devem ser avaliados com muita cautela e associados a outras características da bacia. Na área de estudo, por exemplo, as características do terreno sedimentar e extensão da planície favorecem significativamente a ocorrência de inundações.

Hirata e Burkert (2020), que estudam a bacia do Ribeirão Lajedo (SP), indicam que além da análise da morfometriaé necessário se obter maiores informações sobre os componentes hidrológicos, físicos, ecológicos, além do processo de desenvolvimento urbano na bacia, a fim de se garantir um adequado planejamento para o uso do solo e o devido aproveitamento da bacia.

Na tabela 6 são apresentadas as características referentes às sub-bacias da bacia Grijalva-Villahermosa. Os índices de circularidade podem ser considerados baixos e médios, o que sugere uma disposição mais alongada das sub-bacias. Da mesma forma, os valores de densidade de drenagem também são considerados baixos. Logo, assim como a bacia Grijalva-Villahermosa, as sub-bacias não apresentam uma morfologiafavorável a inundações, pois são mal drenadas, uma vez que todas apresentam valores de densidade de drenagem abaixo de 3 km/km^2 e são consideradas de baixa densidade de drenagem de acordo com a literatura (CHRISTOFOLETTI, 1969apudTEODORO*et al*., 2007) e França (1968). De acordo com Christofoletti (1969) apud Teodoro *et al*. (2007) bacias com densidade de drenagem menores que 7,5 km/ km^2 correspondem à baixa densidade de drenagem, para Sthraler (1957) apenas as bacias com densidade de drenagem menores que 5,00 km/km^2 correspondem à baixa densidade de drenagem.

Para avaliar a susceptibilidade da bacia Grijalva-Villahermosa ainundações, foi realizada a integração dos parâmetros físicos, levando-se em consideração a divisão em sub-bacias. A tabela 7 apresenta os valores obtidos para cada parâmetro por sub-bacia. Em seguida, foi necessário homogeneizar tais valores e classificar sua série em função do grau relativo de suscetibilidade (Tabela 8).A partir da análise da tabela 8 observa-se que, das 26 sub-bacias, apenas uma apresenta susceptibilidade muito baixa, cinco baixa, treze média, cinco alta e duas muito alta. Tal resultado foi espacializado no mapa apresentado na figura 8.

Tabela 6. Parâmetros morfométricos das sub-bacias da bacia Grijalva-Villahermosa. Ver localização dos códigos (coluna 1) na figura 1.

Código	Sub-bacia	Área (km2)	Perímetro (km)	Ic	L (km)	Dd(km/km2)	H (m)
27	Tzimbac	252,30	127,65	0,19	545,80	2,16	2241,00
28	Zayula	419,59	119,36	0,37	1026,00	2,45	2360,00
29 e 32	Presa Penitas e Mezcalapa	1280,93	352,77	0,13	2700,63	2,11	1022,00
30	Paredón	381,67	117,98	0,34	934,96	2,45	641,00
31	Platanar	399,61	129,92	0,30	1166,38	2,92	1104,00
33	Carrizal	1164,76	266,95	0,21	778,18	0,67	20,00
34	Tabasquillo	251,05	81,98	0,47	132,92	0,53	0,00
35	Cunduacán	507,84	192,94	0,17	360,30	0,71	30,00
36	Samaria	548,58	127,68	0,42	638,23	1,16	10,00
37	Cuxcuchapa	633,27	158,14	0,32	342,66	0,54	20,00

Código	Sub-bacia	Área (km2)	Perímetro (km)	Ic	L (km)	Dd(km/km2)	H (m)
38	Basca	438,82	124,92	0,35	585,27	1,33	860,00
39	Yashijá	565,54	155,44	0,29	823,63	1,46	1750,00
40	Shumulá	1006,30	192,22	0,34	1331,72	1,32	2160,00
41	Puxcatán	673,85	184,86	0,25	890,75	1,32	2140,00
42	Chacté	1489,55	218,45	0,39	2133,29	1,43	2640,00
43	Los Plátanos	610,80	139,07	0,40	839,70	1,37	2600,00
44	Tulijá	1698,44	337,95	0,19	2337,95	1,38	1490,00
45	Macuspana	1178,36	228,64	0,28	1533,00	1,30	2090,00
46	Almendro	1042,03	174,61	0,43	1603,11	1,54	2441,00
47	Chilapa	2171,32	253,80	0,42	1990,16	0,92	270,00
48	Tacotalpa	514,18	171,96	0,22	650,01	1,26	1010,00
49	Chilapilla	685,10	152,08	0,37	1157,75	1,69	60,00
50	La Sierra	1072,72	267,25	0,19	1730,12	1,61	2450,00
51	Pichucalco	1313,18	260,71	0,24	2562,63	1,95	2130,00
52	ViejoMezcalapa	565,69	165,15	0,26	1130,99	2,00	70,00
74	Grijalva	1923,85	465,21	0,11	1486,50	0,77	80,00

Fonte: Elaboração própria.

É possível perceber que a susceptibilidade do meio físico varia de muito baixa para muito alta, na medida em que o relevo passa de ondulado e montanhoso a plano. A susceptibilidade muito baixa ocorre apenas na sub-baciaTzimbac, enquanto que a muito alta nas sub-baciasGrijalva e Tabasqui. A cidade de Villahermosa encontra-se no limite entre susceptibilidade média e alta (Figura 8). A zona de transição entre os distintos comportamentos geomorfológicos da bacia é caracterizada por susceptibilidade média. As duas sub-bacias que apresentam susceptibilidade muito alta estão em terrenos onde predominam a declividade baixa, tendendo a plana. Assim, o produto apresentado na figura 8 está de acordo com os mapas apresentados para os dados de declividade (Figura 6) e de curvatura (Figura 7).

Tabela 7. Parâmetros físicos obtidos para cada sub-bacia da Bacia Grijalva-Villahermosa. Ver localização dos códigos (coluna 1) na figura 1.

Código	Sub-bacia	Comp. Geo *	Textura do solo	Dd (km/km2)	H	Curv. Relevo
27	Tzimbac	> 400	Grossa	2,16	2241	-1
28	Zayula	> 400	Grossa	2,45	2360	-1
29 e 32	Presa Penitas e Mezcalapa	0 -20	Média	2,11	1022	0
30	Paredón	0 - 20	Média	2,45	641	0
31	Platanar	101 -200	Média	2,92	1104	0
33	Carrizal	0 - 20	Fina	0,67	20	0
34	Tabasquillo	0 - 20	Fina	0,53	0	0

Código	Sub-bacia	Comp. Geo *	Textura do solo	Dd (km/km2)	H	Curv. Relevo
35	Cunduacán	0 - 20	Grossa	0,71	30	0
36	Samaria	0 - 20	Média	1,16	10	0
37	Cuxcuchapa	0 - 20	Média	0,54	20	0
38	Basca	> 400	Média	1,33	860	0
39	Yashijá	> 400	Média	1,46	1750	-1
40	Shumulá	> 400	Grossa	1,32	2160	-1
41	Puxcatán	> 400	Grossa	1,32	2140	-1
42	Chacté	> 400	Grossa	1,43	2640	-1
43	Los Plátanos	> 400	Grossa	1,37	2600	-1
44	Tulijá	> 400	Grossa	1,38	1490	-1
45	Macuspana	0 - 20	Média	1,3	2090	0
46	Almendro	> 400	Grossa	1,54	2441	-1
47	Chilapa	0 - 20	Fina	0,92	270	0
48	Tacotalpa	0 - 20	Média	1,26	1010	0
49	Chilapilla	0 - 20	Fina	1,69	60	0
50	La Sierra	> 400	Média	1,61	2450	0
51	Pichucalco	0 - 20	Média	1,95	2130	0
52	ViejoMezcalapa	0 - 20	Média	2	70	0
74	Grijalva	0 - 20	Fina	0,77	80	0

** O parâmetro Comp.Geo refere-se à predominância em cada sub-bacia. Isto explica a ausência dos intervalos 21-100 e 201-400. Fonte: Elaboração própria.*

Tabela 8. Valores dos parâmetros e susceptibilidade das sub-bacias da bacia Grijalva--Villahermosa. Ver localização dos códigos (coluna 1) na figura 1.

Código	Sub-bacia	Ic	Comp. Geo	Text. Solo	Dd	H	Curv. Relevo	Σ	Susceptibilidade
27	Tzimbac	1	1	1	1	1	2	7	Muito Baixa
28	Zayula	2	1	1	1	1	2	8	Baixa
29 e 32	Presa Penitas e Mezcalapa	1	3	2	2	2	3	13	Média
30	Paredón	2	3	2	1	3	3	14	Média
31	Platanar	1	2	2	1	2	3	11	Média
33	Carrizal	1	3	3	3	3	3	16	Alta
34	Tabasquillo	2	3	3	3	3	3	17	Muito Alta
35	Cunduacán	1	3	1	3	3	3	14	Média
36	Samaria	2	3	2	3	3	3	16	Alta

Código	Sub-bacia	Ic	Comp. Geo	Text. Solo	Dd	H	Curv. Relevo	Σ	Susceptibilidade
37	Cuxcuchapa	1	3	2	3	3	3	15	Alta
38	Basca	2	1	2	2	3	3	13	Média
39	Yashijá	1	1	2	2	2	2	10	Média
40	Shumulá	2	1	1	3	1	2	10	Média
41	Puxcatán	1	1	1	3	1	2	9	Baixa
42	Chacté	2	1	1	2	1	2	9	Baixa
43	Los Plátanos	2	1	1	2	1	2	9	Baixa
44	Tulijá	1	1	1	2	2	3	10	Média
45	Macuxpana	1	3	2	3	1	3	13	Média
46	Almendro	2	1	1	2	1	2	9	Baixa
47	Chilapa	2	3	3	3	3	3	17	Muito Alta
48	Tacotalpa	1	3	2	3	2	3	14	Média
49	Chilapilla	2	3	3	2	3	3	16	Alta
50	La Sierra	1	1	2	2	1	3	10	Média
51	Pichucalco	1	3	2	2	1	3	12	Média
52	ViejoMezcalapa	1	3	2	2	3	3	14	Média
74	Grijalva	1	3	3	3	3	3	16	Alta

Fonte: Elaboração própria.

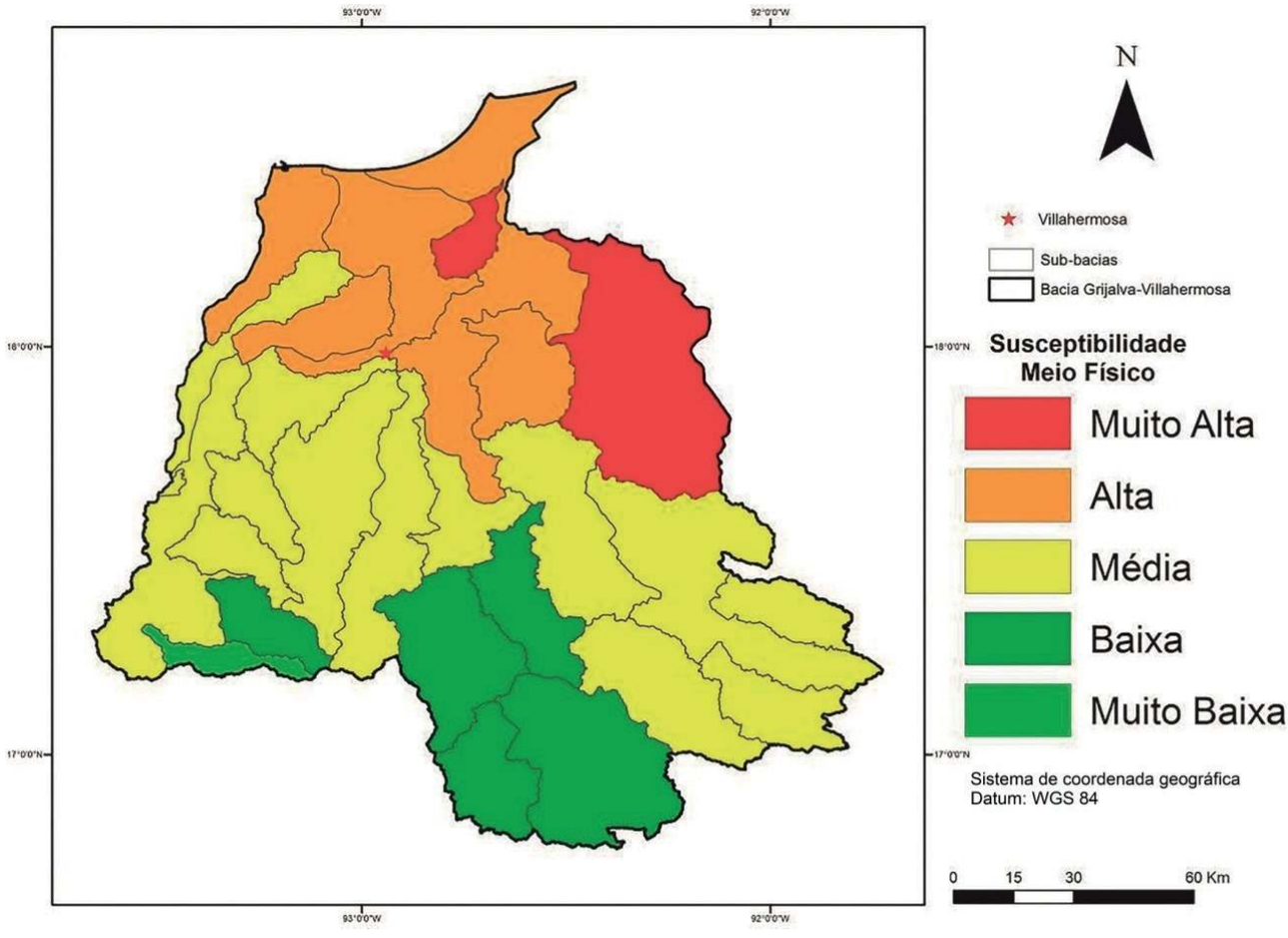

Figura 8. Mapa de susceptibilidade do meio físicoà ocorrência de inundações.

Fonte: Elaboração própria.

Considerando o fato de que na natureza ocorrem diversos fenômenos que fazem parte da dinâmica terrestre e são responsáveis pela estruturação da paisagem, e que quando estes ocorrem, ou se deslocam sobre um sistema social podem causar uma situação potencial de perigo à pessoas e bens, os limites das áreas urbanas contribuíram com a análise para a identificação das áreas de perigo (MARCELINO, 2007).

Segundo Kelman (2002), o conceito de risco está associado ao perigo e à vulnerabilidade. O perigo se refere à potencialidade do fenômeno natural causar danos à sociedade. A vulnerabilidade, por outro lado, se refere às características da sociedade em reagir aos danos causados pelo fenômeno.

No presente trabalho, os polígonos de área urbana foram adotados como limites de perigo por ser um local de concentração da sociedade. A figura 9 apresenta as áreas urbanas da Bacia Grijalva-Villahermosa juntamente com a susceptibilidade do meio físico.

Com base apenas na susceptibilidade do meio físico (Figura 8), a cidade de Villahermosa encontra-se ocupada por moradores que se enquadram entre os limites das classes média e alta. Mas, sabe-se que o fenômeno de inundação que ocorre no entorno da cidade muitas vezes apresenta características desastrosas para a população, como ocorrido nos anos de1980, 1995, 1999, 2007 e 2010 (SANCHEZ, 2011).

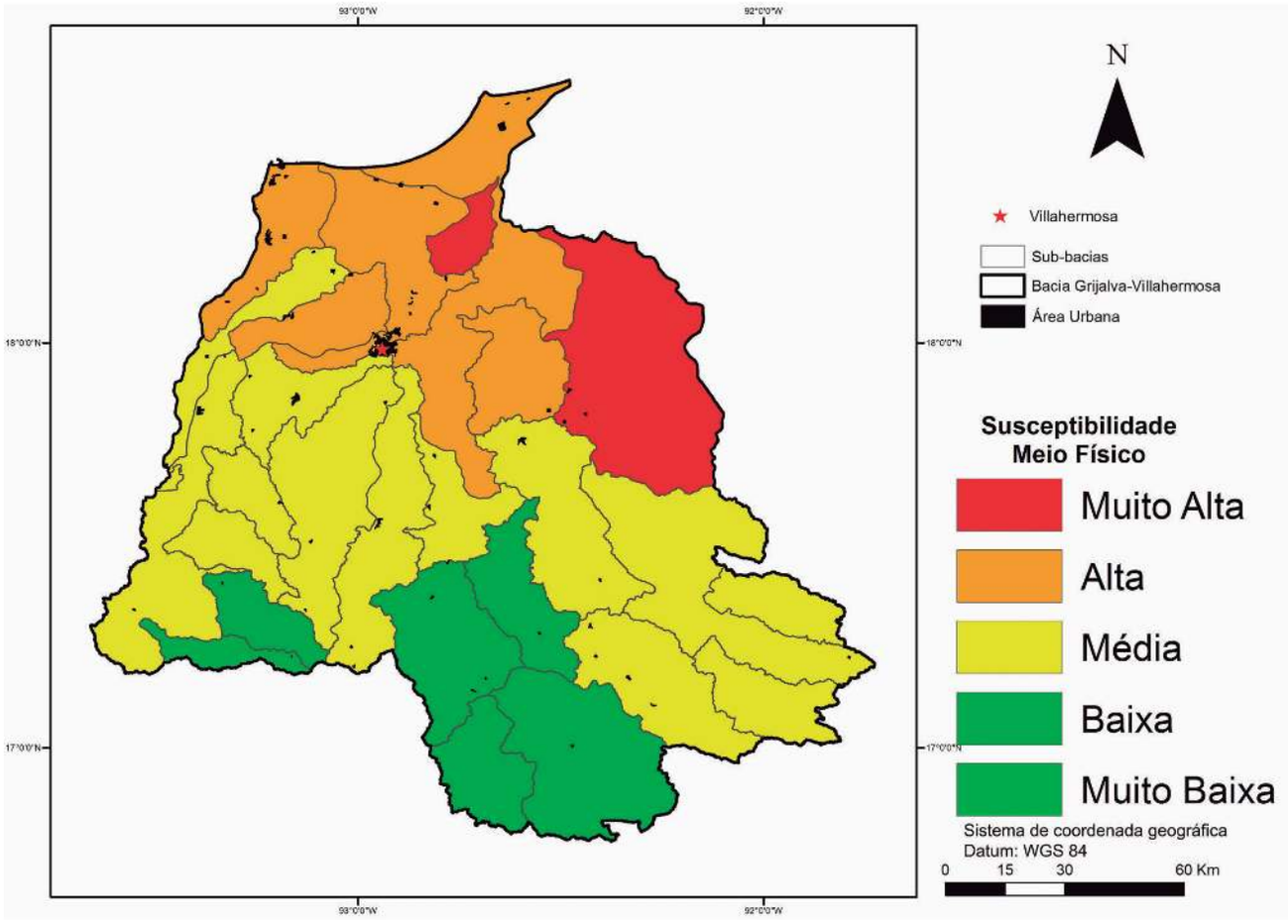

Figura 9. Susceptibilidade do meio físico e limite de áreas urbanas.

Fonte: Elaboração própria.

De acordo com Tucci (1993), a ocupação da bacia hidrográfica pela população gera duas preocupações distintas: o impacto do meio sobre os agrupamentos humanos através das enchentes e a influência do homem sobre a bacia, ameaçando a preservação do ambiente. Comumente, a ocupação da bacia ocorre no sentido de jusante para montante, em função das características do relevo, que são mais acessíveis em suas partes mais baixas.

Com o crescimento da ocupação humana, o curso natural dos rios é modificado por obras de urbanização. Quando não se deixa um espaço livre para acomodar as cheias naturais, as águas procuram outros caminhos, podendo provocar danos associados a inundações. Segundo Miguez& Mascarenhas (1999) e Miguez (2001), os projetos de drenagem têm que ser compatibilizados com a estratégia de crescimento urbano. Assim, os projetos de drenagem urbana devem considerar o funcionamento de toda a bacia hidrográfica de forma integrada, a fim de evitar a geração de grandes áreas alagáveis. Muitas vezes, são realizadas obras com o objetivo de conter a cheia. Entretanto, quando não se considera a bacia como um todo, o problema é apenas transferido para outro local em seu interior.

É comum, em regiões metropolitanas como o entorno de Villahermosa, o crescimento urbano ser realizado sem um planejamento adequado. Isto provoca inúmeras consequências, do ponto de vista da bacia hidrográfica. Seu regime hídrico, por exemplo, é modificado, podendo provocar o fenômeno de inundação, visto que a reduzida capacidade de infiltração no solo resulta no aumento do volume de águadisponível para o escoamento. Com efeito, a bacia urbana perde boa parte de sua cobertura vegetal e apresenta muitas superfíciesimpermeáveis, como as áreas asfaltadas e as construções, que impedem a infiltração da água no solo e favorecem o escoamento superficial. Por isso, as inundações são geralmente mais graves e frequentes nas áreas urbanas.

Para Campos (2001), o crescimento deste fenômeno está diretamente relacionado à forma de ocupação do solo urbano. Muitas vezes, as modificações de uso do solo promovem a quebra do equilíbrio sedimentológico da bacia, porque são produzidos maiores volumes de resíduos que acompanham o escoamento, promovendo várias alterações na rede de drenagem. Em suma, todo o contexto do crescimento urbano não planejado causa sérios impactos no estado natural da bacia hidrográfica, alterando os padrões de escoamento e, consequentemente, favorecendo a ocorrência de inundações.

De acordo com as informações do DOF (2010) a população da bacia Grijalva-Villahermosa se concentra em zonas rurais (54,29%) e a população urbana (45,71%) concentra-se predominantemente ao redor da cidade de Villahermosa que representa o centro das atividades econômicas, políticas e industriais.

Em 2005, dois anos antes do maior evento de inundação dos anos recentes, a população do estado de Tabasco era de 1.990.000 habitantes, dos quais 55% já se concentravam em zonas urbanas, preferencialmente no entorno de Villahermosa. Assim, a alta concentração populacional provocou a ocupação de áreas muito próximas aos rios, considerando a baixa altimetria da cidade (aproximadamente 10 metros), a vasta rede hidrográfica (60% do território) e os altos índices de precipitação, pode-se entender as graves consequências frente aos eventos de inundação. De acordo com os dados da FundacionIdea (2009), de um total de 1456 localidades ocupadas pela população, 57,5% foram afetadas pela inundação de 2007, apresentando impactos econômicos da ordem de 30.000.000 em pesos distribuídos entre os setores produtivo e social, infraestrutura e atenção emergencial.

Com a sobreposição mostrada na Figura 9, percebe-se que as áreas mais críticas seriam as sub-bacias Chilapa e Tabasqui (representadas em vermelho). Nessas áreas, assim como no entorno da cidade de Villahermosa,tem-se uma localização de risco e recomenda-se o contínuomonitoramento e a geração de produtos de altimetria bem detalhados, obtidos, por exemplo, a partir de dados LIDAR (Light DetectionAndRanging), para simulação de situações de desastres naturais como os de inundações.

Considerações finais

O presente trabalho demonstrou que informações extraídas da morfologia do terreno ofereceram importantes contribuições para a caracterização dos aspectos do meio físico. Com os resultados obtidos ficou evidente o papel da geomorfologia no entendimento da dinâmica dos fluxos d'água em uma bacia hidrográfica. Os resultados foram bastante importantes para a identificação de domínios de retenção e evasão de sedimentos, bem como de domínios fornecedores de sedimentos e água para as sub-bacias de drenagem que compõem osistema fluvial. Deste modo, foram reconhecidas localidades com distintas morfodinâmicas (diferentes graus de suscetibilidades a processos erosivos e sedimentares), podendo fornecer, assim, uma primeira aproximação do grau de instabilidade ambiental da bacia e fornecer informações básicas em projetos de planejamento e manejo de uso do solo.

A construção de um MDT específico também foi importante no processo de conhecimento das condições de dinâmicas diferenciais do terreno, visto que o produto obtido representou a superfície real do terreno e apresentou resolução espacial bem melhor que os dados disponíveis em domínio público. O MDT possibilitou um bom detalhamento da morfologia do terreno e viabilizou a geração de produtos secundários relevantes para a caracterização do meio físico da bacia.

A análise geomorfológica apontou para as condições físico-ambientais de favorecimento à apreensão dos fatores naturais de inundação em relação aosterrenos rebaixados da bacia Grijalva-Villahermosa. Sendo, portanto, de interesse para as políticas de gestão o conhecimento das sub-bacias aqui indicadas como de maior aporte de água e materiais para as áreas inundáveis.

Cabe ressaltar que a metodologia aqui aplicada foi proposta para uma área teste, a bacia hidrográficaGrijalva-Villahermosa, onde está inserida a cidade de Villahermosa. No entanto, mediante a disponibilidade de dados, a mesma abordagem pode ser aplicada em outras áreas.

Por fim, o presente diagnóstico da bacia pode trazer diversos benefíciosà sociedade por ser um guia para as políticas públicas de prevenção e controle de inundações, contribuindo para evitar danos sociais, ambientais e econômicos provocados por desastres naturais decorrentes de inundações.

Agradecimentos

À Agência Nacional do Petróleo (ANP), pelo apoio financeiro no primeiro ano de pesquisa.

Aos queridos amigos mexicanos: Guadalupe Fuentes, Alejandro Ponce, Roberto Rodrigues e Toledo Sanchez, sempre muito solícitos.

Referências

BARROS, R.S. **Avaliação da Altimetria de Modelos Digitais de Elevação Obtidos a Partir de Sensores Orbitais**. Tese (Doutorado). 172f. Programa de Pós-Graduação em Geografia. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, RJ, 2006.

CAMPOS, R.O.G. **Inundações Urbanas**: Considerações gerais e modelação matemática com incorporação da obstrução por resíduos sólidos. Dissertação (Mestrado). 269 f.Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro/RJ, 2001.

CARDOSO, C.A.; DIAS, H.C.T.; SOARES, C.P.B.; MARTINS, S.V. Caracterização morfométrica da Bacia Hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.

CASTILLO, F. G; ALAVEZ, C. H; FABELA, E. R; GONDI, F. G; CORONA, C. L; PRADO, K. P; RODRIGUEZ, P. M. H; MARTINEZ, J. A; SALMONES, D. G; FARIAS, J. H. **Programa de Desarrollo Urbano de La Zona Metropolitana de Villahermosa-Nacajuca, Tabasco**. Facultad de Arquitectura, Centro de Investigaciones y Estudios de Posgrado, Coordinación de Vinculación, Laboratorio de Planeación Urbana Y Regional. Secretaria de Desarrollo Social. Gobierno del Estado de Tabasco Dirección General de Ordenamiento Territorial. 2008.

DIARIO OFICIAL DE LA FEDERACIÓN - DOF. **Acuerdo por el que se dan a conocerlos estudios técnicos de águas nacionales superficiales de lãs subregiones hidrológicas Alto Grijalva, Medio Grijalva y Bajo Grijalva de La región hidrológica nº 30 Grijalva-Usumacinta**. Emitidoem5 de abril de 2010 e publicadoem 29 de abril de 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. ServiçoNacional de Levantamento e Conservação de Solos. In: **Reunião Técnica De Levantamento De Solos**, 10, 1979, Súmula.Rio de Janeiro, 1979.

FIGUEIREDO, A.P.S. Determinação da mancha de inundação do município de Itajubá na enchente de janeiro/2000. In: **Anais**.Simpósio Brasileiro de SensoriamentoRemoto, XI, p.1791-1794, Belo Horizonte, MG. 2003.

FRANÇA, G. V. Interpretação fotográfica de bacias e redes de drenagem aplicada a solos da região de Piracicaba. Tese (Doutorado). 151 f. Pós-Graduação em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas. Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1968.

FUNDACION IDEA. **Cuando el rio suena. Las inundaciones em tabasco y las políticas públicas**. 2009.

GROHMANN, C. H. Aplicações dos modelos de elevação SRTM em geomorfologia. **Revista geográfica acadêmica**. v. 2, n. 2, p.73-83, 2008.

HIRATA, A. A.; BURKERT, D. Morfometria da Bacia do Ribeirão Lajeado-SP. **Formação (Online)**. v. 27, n. 50, p.175-199, 2020.

KELMAN, I. **Physical flood vulnerability of residential properties in coastal, eastern England.** Tese (Pós-doutorado). 311f.University of Cambridge, UK, 2002.

LIMA, W.P. **Hidrologia Florestal Aplicada ao Manejo de Bacias Hidrográficas**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2 ed., 2008.

MARCELINO, E.V. **Desastres Naturais e Geotecnologias**: Conceitos Básicos. INPE, Santa Maria, 2007.

MEIS, M.R.; MIRANDA, L.H.G.; FERNANDES, N.F. Desnivelamento de altitude como parâmetro para a compartimentação do relevo: bacia do médio-baixo Paraíba do Sul. In: **Anais do Congresso Brasileiro de Geologia**, XXXII, p. 1489-1509, Salvador, BA. 1982.

MIGUEZ, M. G. **Modelo matemático de células de escoamento para bacias urbanas**. Tese (Doutorado).410 f. Pós-Graduação em Engenharia Civil, COPPE, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

MIGUEZ, M. G; MASCARENHAS, F. C. B. Modelação matemática de cheias urbanas através de um esquema de células de escoamento. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v. 4, n. 1, p. 119-140, 1999.

NARDIN, D.; ROBAINA, L E.S. Mapeamento de Unidades do Relevo no Oeste do RS: O Caso da Bacia Hidrográfica do Arroio Miracatú. In: **Anais**. Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, XI, São Paulo, USP, p. 3576-3588, 2005.

OLIVEIRA, S.N; CARVALHO JÚNIOR, O.A; SILVA, T.M; GOMES, R.A.T; MARTINS, E.S; GUIMARÃES, R.F; SILVA, N.C. Delimitação Automática de Bacias de Drenagens e Análise Multivariada de Atributos Morfométricos Usando Modelo Digital de Elevação

Hidrologicamente Corrigido. **Revista Brasileira de Geomorfologia**. v.8, n. 1, p. 3-21, 2007.

OLIVEIRA, G.G; SALDANHA, D.L; GUASSELLI, L.A. Espacialização e Análise das Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Caí/RS. **Geociências**. v. 29, n. 3, p. 413-427, 2010.

PINEDA, J.M.N; SANCHEZ, H.T. Transformación de la Cuenca del Rio Grijalva. **Revista de Notícias AMIP**. v.4, n. 16, p. 11-22, 2009.

RENNO, C. D; SOARES, J. V. Discretização espacial de baciashidrográficas. In:. **Anais**. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, X, p.485-492, Foz do Iguaçu, PR. 2001.

SÁNCHEZ, H. M. T. **Fragilidad, vulnerabilidad y riesgo emlacuenca baja del sistema Grijalva-Usumacinta**. Dissertação (Mestrado). 142 f. Pós-Graduação em Engenharia Civil. Instituto Politécnico Nacional. Distrito Federal, México, 2011.

SANTOS, A.F. **Morfometria da microbaciahidrográfica do Ribeirão faxinal Botucatu – SP e alterações em suas áreas de biomassa no período de 1972 a 2000**. 59 f. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Ciências Agronômicas. Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, SP, 2004.

SILVA, T.M. **A Estruturação Geomorfológica do Planalto Atlântico no Estado do Rio de Janeiro**. Tese (Doutorado). 265f. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Geociências, UFRJ. Rio de Janeiro, RJ. 2002.

SILVA, T.M. MONTEIRO, H. S; CRUZ, M. A; MOURA, J. R. S. Anomalias de drenagem e evolução da paisagem no médio vale do rio Paraíba do Sul (RJ/SP). **Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ**. v. 29-42, p. 210-224, 2006.

SOUZA, C.R.G. Suscetibilidade Morfométrica de Bacias de Drenagem ao Desenvolvimento de Inundações em Áreas Costeiras. **RevistaBrasileira de Geomorfologia**. v. 6, n. 1, p. 45-61, 2005.

STHRALER, A.N. Quantitative analysis of watershed geomorphology. **Trans. American Geophysical Union**. v. 38, p. 913-920, 1957.

TEODORO, V.L.I; TEIXEIRA, D; COSTA, D.J.L; FULLER, B.B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **RevistaUniara**. n. 20, p. 137-156, 2007.

THOM, B. G. Mangrove Ecology and Deltaic Geomorphology: Tabasco, México. **The Journal of Ecology**. v. 55, n. 2, p. 301-343, 1967.

TONELLO, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG**. Dissertação (Mestrado). 69f. Pós-Graduação em Ciência Florestal. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

TROEH, F.R. Land form equations fitted to countermaps. **Soil Science Society American Journal**. New York, v. 263, n. 7, p.616-627, 1965.

TUCCI, C. E. M. Hidrologia: Ciência e Aplicação. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: ABRH. p. 25-33, 1993.