

30
Anos

Ano XXIX - Vol. XXIX - (1): Janeiro/Dezembro - 2025


CIÊNCIA
Geográfica
ISSN Online: 2675-5122 • ISSN-L: 1413-7461
www.agbauru.org.br

UTILIZAÇÃO DE MODELO DIGITAL DE ELEVAÇÃO PARA AVALIAÇÃO DE INUNDAÇÕES


USE OF DIGITAL ELEVATION MODEL
FOR FLOOD ASSESSMENT

USO DE MODELO DE ELEVAÇÃO DIGITAL
PARA LA EVALUACIÓN DE INUNDACIONES


Thales Ernildo Lima¹

 0000-0002-8494-0192
lima.thales@unemat.br

Cristiane da Silva Lima²

 0000-0001-6435-2572
cristiane.silva@unemat.br

Celia Alves de Souza³

 0000-0002-9068-9328
celia.alves@unemat.br

1 Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Geografia pela Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8494-0192>. E-mail: lima.thales@unemat.br.

2 Doutora em Ciências ambientais pela Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6435-2572>. E-mail: cristiane.silva@unemat.br.

3 Professora Doutora do Departamento de Geografia da Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9068-9328>. E-mail: celia.alves@unemat.br.

Artigo recebido em maio de 2025 e aceito para publicação em junho de 2025.



RESUMO: A utilização de um modelo tridimensional proporciona a visualização do comportamento da oscilação do nível da água em escala temporal/espacial. O presente estudo objetiva utilizar modelagem de ambientes de tridimensional para simulação de inundações. A simulação tridimensional foi realizada através do Modelo Digital de Elevação – MDE, aplicados ao software Blender 2.81a, permitindo a modelagem da paisagem. A simulação tridimensional proporcionou identificar inundações horizontais (transborda para planície) e verticais (aumento do nível água), por acúmulo do volume de água. As informações obtidas pela régua fluviométrica mostraram variação do nível da água de 0,70 a 5,97 m. Esses valores foram utilizados para os três compartimentos em estudo, em diferentes altitudes. Acredita-se que através das técnicas é possível subsidiar políticas públicas e planejamento da Defesa Civil do município, como por exemplo, simular e prever condições extremas no que diz respeito a entrada de pulso pluviométrico e comportamento fluviométrico.

Palavras-chave: Modelagem. Simulação. Inundação. Blender 3D.

ABSTRACT: The use of a three-dimensional model provides visualization of the behavior of water level oscillation on a temporal/spatial scale. The present study aims to use three-dimensional environment modeling to simulate floods. The three-dimensional simulation was performed using the Digital Elevation Model (DEM), applied to the Blender 2.81a software, allowing modeling of the landscape. The three-dimensional simulation allowed the identification of horizontal floods (overflow to plain) and vertical floods (increase in water level), due to accumulation of water volume. The information obtained by the fluviometric ruler showed variation in water level from 0.70 to 5.97 m. These values were used for the three compartments under study, at different altitudes. It is believed that through these techniques it is possible to support public policies and planning of the Civil Defense of the municipality, such as simulating and predicting extreme conditions regarding rainfall pulse input and fluviometric behavior.

Keywords: Modeling. Simulation. Flood. Blender 3D.

RESUMEN: El uso de un modelo tridimensional permite visualizar el comportamiento de la oscilación del nivel del agua a escala temporal/espacial. El presente estudio busca utilizar el modelado ambiental tridimensional para simular inundaciones. La simulación tridimensional se realizó mediante el Modelo Digital de Elevación (MDE), aplicado al software Blender 2.81a, lo que permitió modelar el paisaje. La simulación tridimensional permitió identificar inundaciones horizontales (desbordamiento de la llanura) y verticales (incremento del nivel del agua), debido a la acumulación de volumen de agua. La información obtenida con la regla fluviométrica mostró una variación del nivel del agua de 0,70 a 5,97 m. Estos valores se utilizaron para los tres compartimentos estudiados, a diferentes altitudes. Se cree que mediante estas técnicas es posible subsidiar las políticas públicas y la planificación de la Defensa Civil del municipio, como la simulación y predicción de condiciones extremas con respecto a la entrada de pulsos de lluvia y el comportamiento fluviométrico.

Palabras clave: Modelado. Simulación. Inundaciones. Blender 3D.

INTRODUÇÃO

As técnicas computacionais também proporcionam a modelagem de ambientes tridimensionais, de maneira que é uma ferramenta tecnológica para desenvolvimento em diversas áreas de design. O conceito modelagem em 3D é concebido por meio de “aplicação matemática da geometria espacial”, diferenciando-se de outros conceitos de modelagem, tendo em vista que são calculados por programas de computador (Santos, 2018, p. 1). As aplicações de técnicas tridimensionais, com ênfase em morfologia, crescem no meio científico sobre análise estrutural usando modelos (Eulitz; Reiss, 2015, p. 190). O ganho desta técnica aplicada à ciência tornou-se possível realizar a construção de espaços geográficos em diferentes escalas (Moreno *et al.*, 2015, p. 131).

As Geotecnologias apresentadas por meio dos Sistemas de Informação Geográficas (SIG) correspondem a um “sistema computacional que trabalha um número infinito de informações de cunho geográfico”. Ou seja, é “um sistema constituído por um conjunto de programas computacionais, a qual integra dados, equipamentos e pessoas” e permite “coletar, armazenar, recuperar, manipular e analisar dados espacialmente referenciados a um sistema de coordenadas conhecido” (Fitz, 2008, p. 81).

Segundo Olaya (2011, p. 8), os SIGs - Sistemas de Informações Geográficas têm a aplicabilidade para a análise do espaço por meio de leitura, visualização, edição e gestão de dados espaciais, que possibilitam interpretar os dados espaciais do mundo e de atividades humanas. Os SIGs também são capazes de executar análise de dados, como consultas de recortes espaciais, em particular, e elaboração de modelos complexos, ressaltando componentes espaciais dos dados e componentes temáticos, além de permitir o diagnóstico e esclarecimento de trechos relativos à superfície terrestre (Olaya, 2011, p. 8).

Rosa (2013) considera que as Geotecnologias ou Geoprocessamento podem ser concebidos “como um conjunto de tecnologias distintas a coleta e tratamento de dados espaciais”. Deste modo, o mesmo apresenta a cartografia digital como sendo a utilização de computadores substituindo as ferramentas antológicas, o processamento digital de imagens, o Sistema de Informações Geográficas e o Banco de Dados Geográficos.

Na atualidade, devido ao avanço tecnológico e computacional pós-revolução técnico-científica, foi difundido o termo e usa-se a definição Geotecnologia para se referir a “aquisição, representação e análise de informações sobre o espaço geográfico”, afirma Dambrós:

Com a globalização, as constantes transformações ocorridas na sociedade vêm oportunizando novas práticas à medida em que a evolução tecnológica, [...]. Na mesma velocidade em que essa dinâmica evolui, o espaço geográfico incorpora novas tecnologias, se reorganiza e consolida cada vez mais o meio técnico-científico-informacional. No contexto da Geografia, a globalização juntamente com a revolução técnico-científica, possibilita o acesso a uma gama de ferramentas, conhecidas como geotecnologias, que permitem a elaboração, sobretudo de representações cartográficas mais complexas e precisas (Dambrós, 2020, p. 163).

As formas de representar o terreno (relevo) tradicionalmente eram feitas pela avaliação subjetiva sobre disposição qualitativa, por isso era necessário objetividade do método, que requeria a intersecção e o mapeamento de certas variáveis do relevo, tais como, altitude, declividade, curvas verticais e horizontais, orientação de vertentes, entre outros (Dent; Young, 1981, p. 5).

Discussões sobre redução de custos aos moldes tradicionais foram colocadas em pauta, pois alternativas como imageamento orbital e geoprocessamento significativamente demonstrava qualidade na organização

da gestão de dados espaciais. Houve certa resistência quanto à qualidade de ensaios tradicionais, mas afinal foi possível alcançar um grau “aceitável de concordância” (Valeriano, 2005, p. 3595).

A inclusão de técnicas de sensoriamento remoto por meio de coleta de dados topográficos favoreceu o desenvolvimento do Modelo Digital de Elevação - MDE (*Digital Elevation Model - DEM*). Essa tecnologia foi produzida através de sensores instalados em satélite artificial, lançado sobre a órbita do planeta. Destaca-se o SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), desenvolvido pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos – USGS (*United States Geological Survey*). O desenvolvimento do projeto foi instituído sobre a necessidade de mapeamento de poções territoriais da África, Oceania e América do Sul, afirma Valeriano (2004, p. 22).

O MDE obtido pela USGS foi satisfatório a necessidade de análise do relevo. No entanto, foi utilizado para atender uma pequena escala, pois as cenas disponibilizadas na resolução espacial eram de 90 metros. Ou seja, representava 8.100 metros quadrados da superfície terrestre. Valeriano (2005, p. 3596) propôs junto ao INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais o desenvolvimento de um tratamento nos metadados do SRTM que resultou em um modelo digital de elevação com resolução espacial de 30 metros quadrados, equivalendo a superfície terrestre de 900 metros quadrados e com isso aprimorou o MDE em 89%.

Os autores Valeriano, Rossetti e Albuquerque (2009, p. 5499) consideram que a oferta dos dados SRTM para América do Sul, no ano de 2003, proporcionou maiores atividades científicas, como a compreensão de relevo e sua topografia. Além disso promoveu a popularização desses dados. Isto ocorreu pela facilidade e desenvolvimento de trabalhos em ambientes digitais e a utilização de algoritmos de SIG de forma acessível e aperfeiçoados. Os autores destacam a necessidade de validação de dados por meio de análise digital com o objetivo de padronizar os MDE.

Considera-se que o SRTM foi uma solução que permitiu aos pesquisadores condições para o desenvolvimento de um banco de dados topográficos de todo o território nacional. O projeto deste banco de dados foi definido de TOPODATA, disponibilizado e hospedado gratuitamente pelo INPE. Os autores consideram a importância desta ferramenta para demandas técnicas, com amplitude a todos os meios de conhecimento possibilitando desenvolver trabalhos de qualidade (Valeriano; Rossetti; Albuquerque, 2009, p. 5499).

O MDE que é gerado para ser utilizado como um modelo topográfico proporcionou aos pesquisadores realizarem análises ambientais e delimitações de bacias hidrográficas. Sobre a perspectiva ambiental, Valeriano (2002, p. 45) fez um ensaio em que utilizou o interpolador krigagem para a construção do Modelo Digital de Elevação, comparando-o com o Inverso do Quadrado da Distância – IQD. O autor concluiu que o MDE gerado por krigagem tem um efeito “indesejado” por se tratar de suavização da amplitude altimétrica, valores máximos e mínimos, em área de relevo íngreme. Contudo, foi possível reproduzir “formas de relevo e feições de drenagem mais realistas” em decorrência da flexibilidade dos relevos suaves a montanhosos.

O desenvolvimento também incentivou trabalhos com foco na perda de solos, como a pesquisa realizada por Araújo (2006, p. 36), que utilizou a Equação Universal de Perda dos Solos (EUPS) com a inserção do MDE, objetivando criar um modelo de erosão em duas bacias hidrográficas localizadas no Maranhão. O autor afirma que os dados obtidos pelo SRTM ampliaram a inserção do sensoriamento remoto, proporcionou a definição da bacia e rede de drenagem e o refinamento de dados pedológicos.

Os dados MDE obtidos pelo SRTM também foram usados para identificação de feições no Pantanal Mato-grossense. Segundo Valeriano e Abdon (2007, p. 395), o Pantanal é um relevo extremamente

baixo com declividade média de 0,08%, ou seja, é considerado plano. O Modelo Digital de Elevação proporcionou identificar feições, que segundo os autores, “raramente ultrapassam 10 m, ocasionalmente atingindo 20 m”. Isso ocorre pela cobertura da vegetação no entorno dos corpos aquosos.

Outra possibilidade que oferece é a modelagem topográfica em terceira dimensão. Valeriano e Rossetti (2008, p. 53) enfatizam em suas pesquisas o processamento dos dados em baixo relevo, com ocorrências de paleocanais. O estudo dos autores motivou a modelagem dessas feições sobre uma perspectiva paramétrica.

Conforme apontado, o avanço tecnológico e computacional permitiu evolução e novas práticas de pesquisas para captação de dados. O desenvolvimento de novas técnicas para coletar a altimetria da superfície terrestre obteve ganhos relevantes com o sensor PALSAR, que se encontra inserido no satélite ALOS após ser lançado em órbita no ano de 2006. O equipamento permite “precisão no monitoramento da cobertura vegetal, desastres e levantamento de recursos naturais”. A obtenção dos dados é gratuita possuindo as correções ortogonal e “projetados no sistema UTM WGS84”, com resolução mista (alta e baixa) de respectivamente 30 a 12,5 metros de resolução espacial (Macêdo; Surya, 2018, p. 49).

A utilização de *softwares* 3D para pesquisas em diversas áreas do conhecimento apresenta crescimento devido à existência de diversos modelos que podem ser criados para representação geomorfométrica de análises da superfície topográfica. Tais variáveis morfométricas são descritas como curvatura horizontal e vertical, curvatura máxima e mínima e área de captação (Florinsky; Filippov, 2017, p. 32). Os respectivos autores desenvolveram modelos que puderam representar virtualmente a morfometria dos globos de Marte e da Lua, com foco na paisagem territorial, que permite a visualização dos globos 3D multi-scala distribuída em datas sobre multi-camadas.

Pesquisas de aplicações morfológicas em 3D também se expandem na Ciência Biológica. Os autores Eulitz e Reiss (2015, p. 190) afirmam que análises estruturais que fazem uso de modelos em três dimensões têm sido realizadas na ciência biológica. E que a reconstrução de superfícies em 3D tonou-se uma ferramenta indispensável para a estrutura de análises em diferentes campos do conhecimento científico e técnico.

Os *softwares* 3D se desenvolvem com maior capacidade e fidelidade na representação de objetos. Isso ocorre pelo desenvolvimento de câmeras de celulares com capacidade de fotogrametria óptica. Ou seja, de maior qualidade na aquisição de dados que servem de subsídios no ato da modelagem e desenvolvimento da estrutura em 3D. Para a modelagem é necessário a captura de imagens em diferentes ângulos, que importados para o software auxiliam na confecção da malha/modelo 3D (Eulitz; Reiss, 2015, p. 190). Os autores ressaltam as vantagens de softwares 3D, como o baixo custo e/ou até mesmo gratuitos. Tais softwares também possibilitam a conversão de malha de um objeto em modelo volumétrico, permitindo a representação física com impressão da superfície em 3D.

As aplicações cartográficas e o desenvolvimento digital vêm permitindo aos pesquisadores à integração de softwares de análise espacial (SIG) e softwares 3D, entre outros, que possibilitam controle e simulação de variáveis em testes, como por exemplo, avaliar o comportamento do ambiente mediante a topografia e morfologia de um recorte espacial (Nóbrega; Silva, 2016, p. 550).

Nóbrega e Silva (2016, p. 554) também afirmam que é possível construir um modelo digital de terreno utilizando o MDE para averiguar uma sequência e variação de inundação em relação à altura da água. Ou seja, para testar padrões de enchentes no tronco de escoamento fluvial do Pantanal mato-grossense, o rio Paraguai.

As técnicas tridimensionais concebem a “modelagem do território em diferentes escalas, que incluem levantamentos cartográficos e a utilização de meios tradicionais de coleta de dados topográficos, com utilização de VANTs (Veículo Aéreo Não Tripulado)”. A reconstrução da superfície também pode ser resultado de utilização de scanners terrestres 3D e técnicas fotogramétricas utilizadas por vários softwares tridimensionais (MORENO *et al.*, 2015, p. 128).

Outras utilidades para aplicações tridimensionais são denominadas de modelo tangível da paisagem. Segundo Harmon *et al.* (2018, p. 5), a utilização de scanner de superfície 3D permite a utilização de realidade aumentada sobre uma caixa de areia. Esta interface tangível permite a modelagem geoespacial. O objetivo é interpretar a modelagem do terreno esculpida sobre a caixa de areia, digitalizando pontos de controle espacial, área, volumes e códigos e/ou marca de cores, irregularidades do terreno e blocos de construções. Posteriormente, ocorreu a interpretação do sensor pelo processamento da superfície, resultando na computação geoespacial sendo projetada de volta no modelo físico, que é a caixa de areia. Portanto, o autor concluiu que a utilização dos SIG, somados a aplicações em três dimensões, torna-se assim uma ferramenta “poderosa” para a representação geoespacial de eventos distintos.

As interfaces tangíveis são “designadas para fazer interações com computadores de forma fácil e mais natural pela manifestação de dados digitais” para que os usuários possam compreender a intercâmbio do meio geoespacial com o computacional, compreendido pela alteração da superfície da caixa de areia (Harmon *et al.*, 2016, p. 647).

Representações de ambientes geoespaciais através da utilização de diferentes tipos de modelos tridimensionais têm sido objetos de pesquisas em áreas como o geográfico, o cartográfico e o topográfico, desde 1960. Tais estudos podem ser entendidos como mapas em modelos 3D compostos por texturização 3D e modelo de objetos. Também podem ser usados para representação de perímetros urbanos e ambientes naturais. Os mapas em 3D possuem vantagens sobre os mapas 2D, especialmente pelo uso da navegação de orientação e por ser mais rápido se comparado com os mapas tradicionais. Outra vantagem refere-se à representação de objetos naturais e geográficos, que se tonam mais fáceis o reconhecimento no mundo real (Virtanen *et al.*, 2015, p. 838).

Contudo, Harmon *et al.* (2016, p. 647) consideram que a modelagem, análise e simulação geoespacial ofertada pelas aplicações computacionais em 3D podem ser desafiadoras, pois necessitam de treinamentos e alta abstração de pensamento.

MATERIAIS E MÉTODOS

Modelo para simulação de inundação

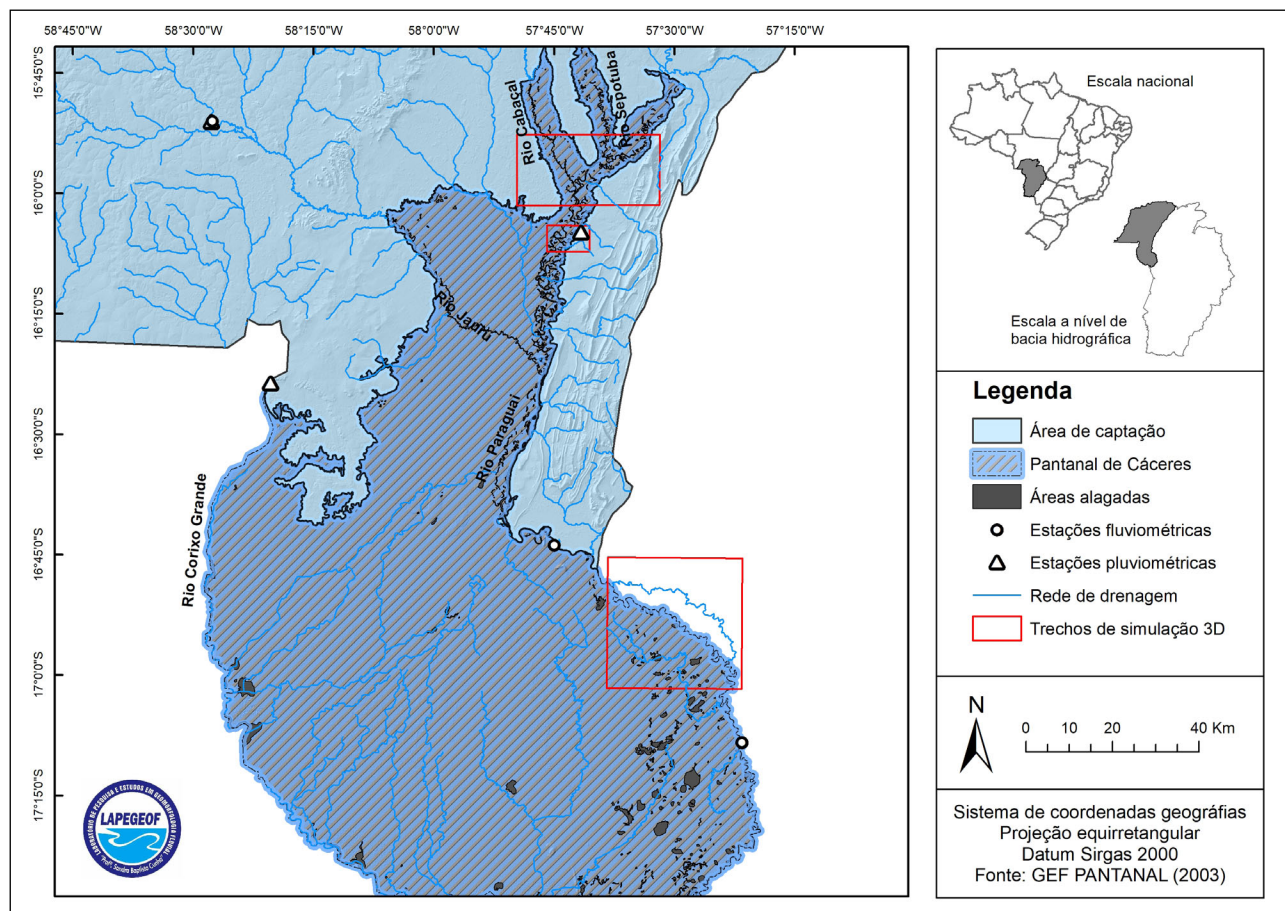
Para simular a inundação relacionou-se três recortes espaciais:

Primeiro recorte: entre a foz do rio Sepotuba e a foz do rio Cabaçal, localizados entre as coordenadas geográficas: 15° 52' 36" a 16° 2' 44" S e 57° 31' 27" a 57° 49' 55" O. Esta área foi selecionada pelo fato de receber grande contribuição hidráulica através do rio Sepotuba e outra grande quantidade de sedimentos através do rio Cabaçal. Desde modo, objetiva-se compreender qual dos rios apresentam maior inundação no corredor fluvial e na planície de inundação;

Segundo recorte: entre a Baía Cumprida e a Baía da Carne Seca, localizado entre as coordenadas geográficas: 16° 04' 00" S a 16° 07' 10" S e 57° 40' 41" a 57° 45' 58" O. Esta área foi escolhida por

causa de sua localização, situada no perímetro urbano de Cáceres. Possui as margens antropizadas e no período de cheia sofre, em algumas localidades, com a inundação da área urbana;

Terceiro recorte: ao entorno da Ilha Taiamã, localizado entre as coordenadas geográficas: 16°43'13"S a 17°3'24"S e 57°13'0" a 57°44'38" O. A terceira e última área foi selecionada por se tratar de uma área de planície pantaneira, onde encontra-se localizada a reserva ecológica Taiamã, que faz limite com o município de Poconé. É alagada o ano todo e por isso é interessante observar o comportamento de inundações em diferentes períodos do ano (seca e cheia), conforme a Figura 1.



Fonte: Elaborado pelos autores.

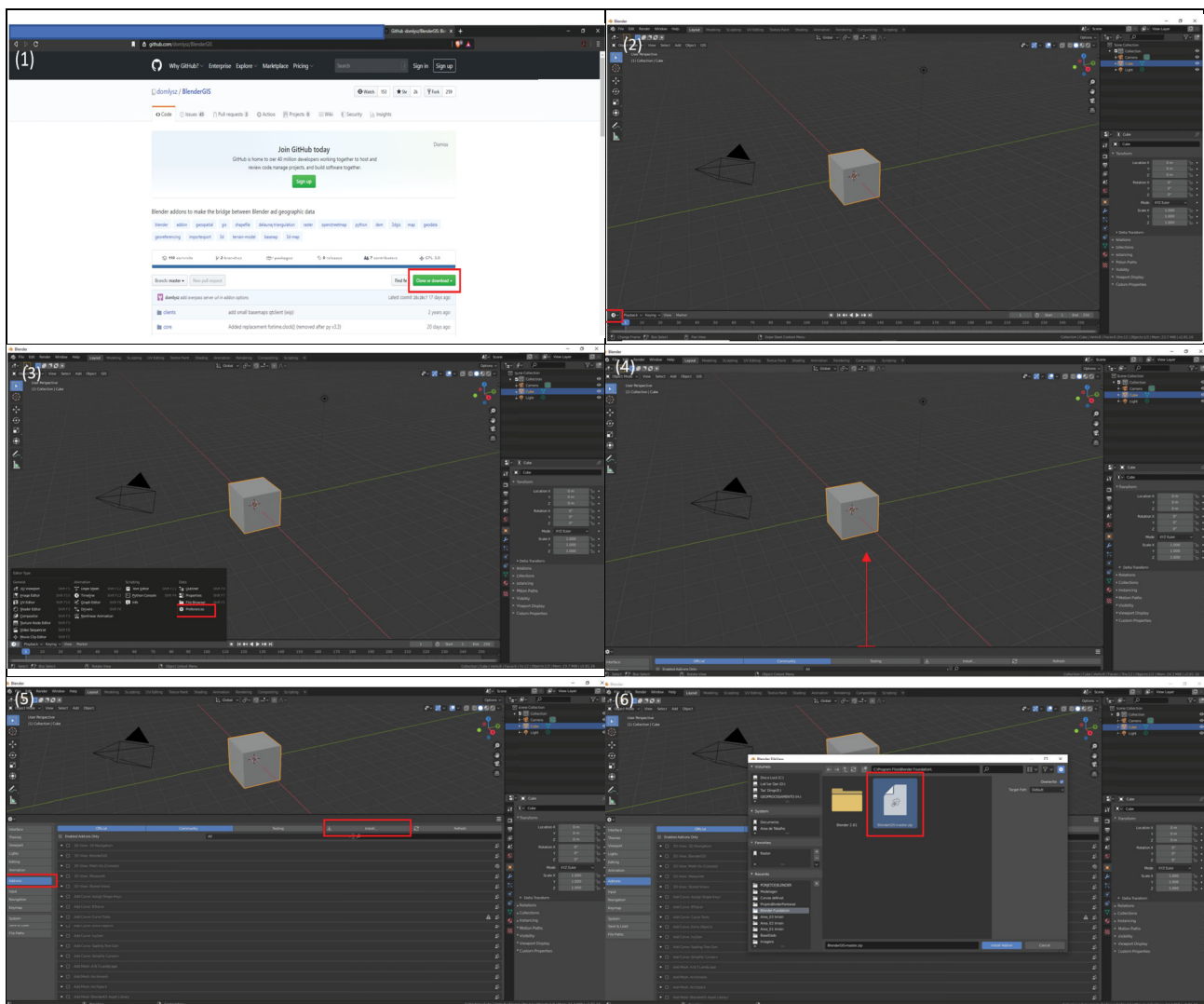
Figura 1. Localização dos três recortes espaciais designados a simulação tridimensional.

Os períodos monitorados foram: enchentes (novembro a fevereiro), cheia (março a abril), vazante (maio a agosto) e seca (setembro a outubro), levando em consideração sobretudo a disponibilidade de dados de pluviosidade e fluviométrica da ANA e do INMET, para uma série temporal de no mínimo 11 anos. Os dados foram tratados por modelagem estatística para definir os níveis de inundação sazonal (mínimo, médio e máximo), sendo este último, denominado de eventos extremos.

A simulação tridimensional do sistema sazonal no Pantanal de Cáceres permitiu a construção da cena e do evento de inundação, simulando assim o sistema hídrico sazonal do Pantanal de Cáceres mato-grossense. Para isso, foi utilizado o Modelo Digital de Elevação (MDE), elaborado pelo projeto TOPODATA (Valeriano, 2008), com resolução espacial de 30 m, que possibilitou a extração dos respectivos subprodutos (declividade do terreno e relevo sombreado) por meio do SIG.

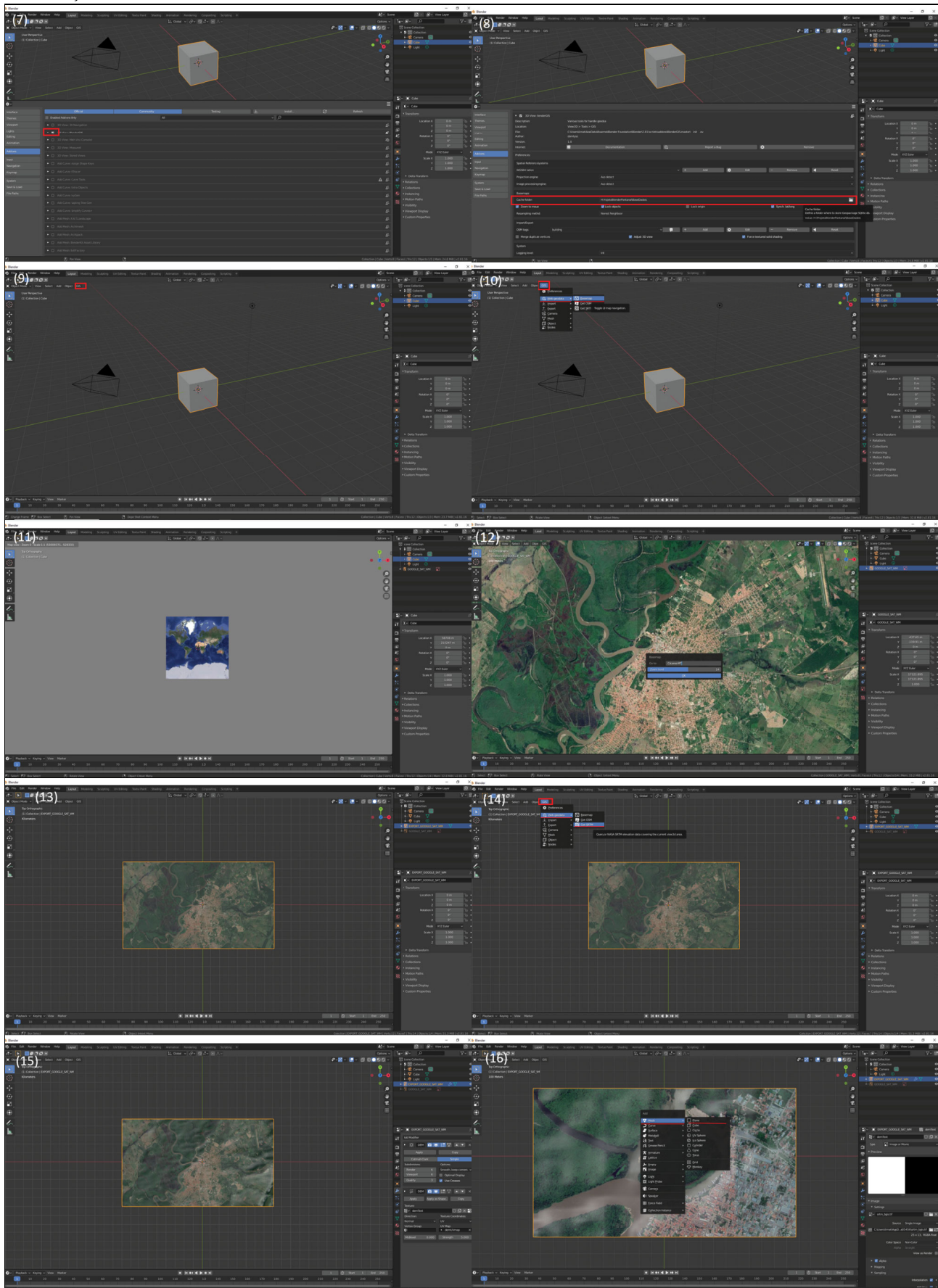
Posterior à construção do plano de informação de referência (MDE), através do Blender 2.81a (software open source para modelagem 3D e animações), foi possível instalar e aplicar o Addon BlenderGIS, disponível no site <https://github.com/domlysz/BlenderGIS>, que permite trabalhar com informações espaciais. Deste modo, foi possível transformar um plano em cena espacial, de acordo com a Figura 4. Para visualizar a imagem é preciso seguir os seguintes passos (Figura 2):

Acessar o site mencionado: <https://github.com/domlysz/BlenderGIS> e fazer o *download* em formato (*.zip). Salvar em pasta a critério do usuário (1). Depois de baixar o arquivo é necessário abrir o *software*. Em seguida acessar clicando no relógio, no lado inferior esquerdo, para ter acesso a outras opções (2). O terceiro passo é selecionar as preferências, ou seja, sua configuração (3).



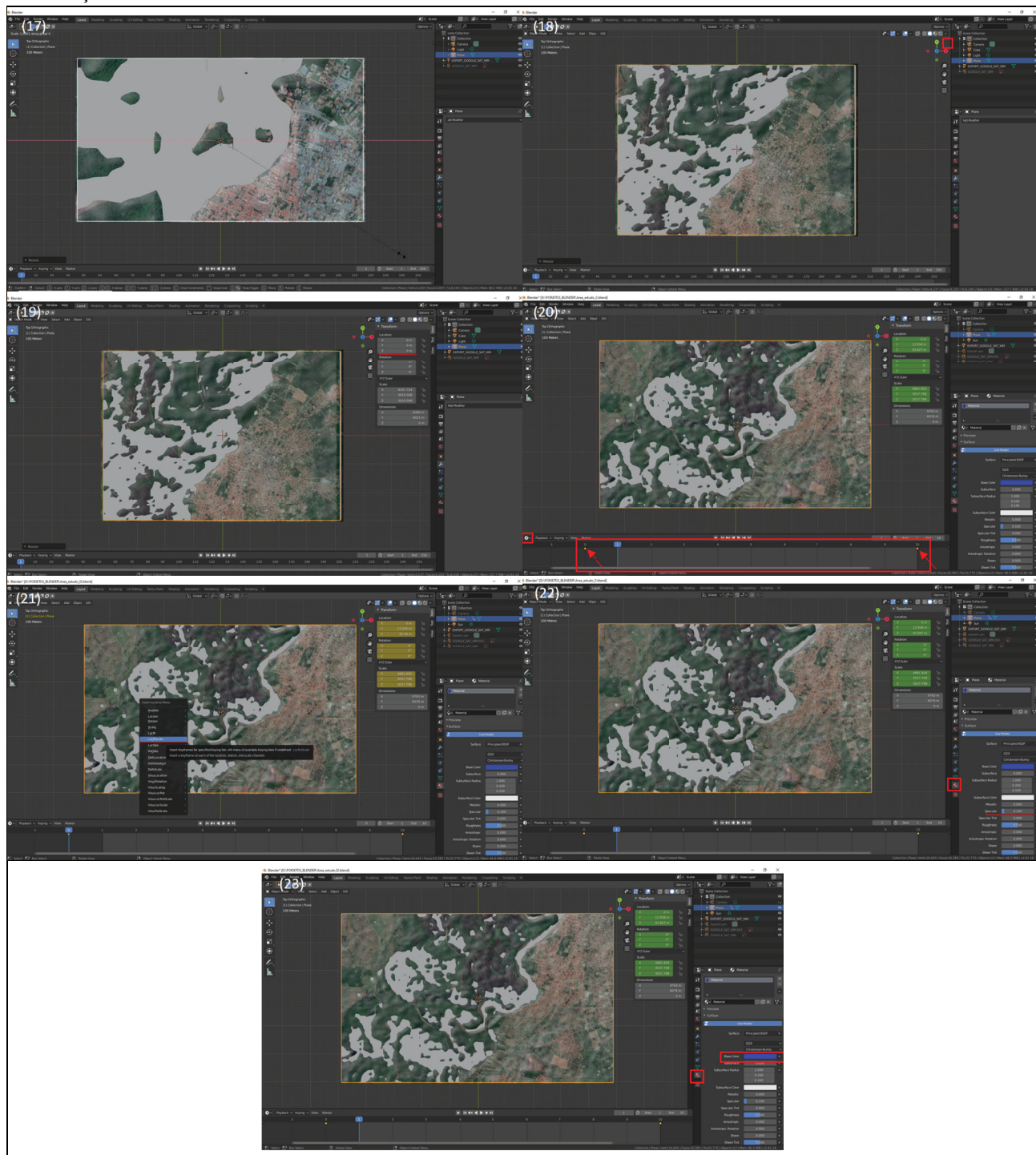
continua

continuação



continua

continuação



Fonte: Elaborado pelos autores.

Figura 2. Sequenciais 1 a 23, orientação para instalação, configuração e modelagem espacial.

Após clicar em *Preferences* é necessário expandir a área de visualização e selecionar a opção de instalação *add-on* (4). Neste campo aparecerá vários *add-ons*, porém, para a instalação do BlenderGIS é necessário clicar no botão de instalação e selecionar o arquivo (*.zip) que foi baixado no computador (5). Posteriormente à instalação é necessário configurá-lo. Assim, precisa clicar no *checkbox* para ativação da função no Blender (6). Em seguida é necessário clicar na seta que expande as informações

do *add-on* (7). Nesta tela o mais importante é informar ao software onde será o *cash folder*, ou seja, a pasta onde será salvo os arquivos temporários (8).

Após a instalação do *add-on* uma aba GIS ficará disponível no *layout* de entrada do Blender (9).

Para o correto funcionamento desta aplicação em alguns computadores será solicitado pelo Blender a instalação do GDAL, que pode ser adquirido instalando o SIG Quantum GIS – QGIS. Ou se preferir, poderá instalar e configurá-lo conforme tutorial disponível na internet (<https://gdal.org/>) e (<https://www.youtube.com/watch?v=4viTd3n9C9g>).

Após o término dos procedimentos mencionados inicia-se a modelagem tridimensional das cenas espaciais, clicando na aba GIS (a exclusão do cubo *default* não é necessário), selecionando o item *web geodata* e posteriormente selecionando a opção *basemap* (10).

Neste momento é possível optar pelas fontes da imagem (Google, OSM, Bing e OSM WMS). Do mesmo modo, também é necessário optar pelas camadas satélite ou map. Para esta pesquisa, a fonte escolhida foi o Google e a camada imagem de satélite (11).

Para o experimento foi necessário marcar a área de estudo pressionando a tecla “G” e indicar a palavra-chave para localização e escala. Na pesquisa, a palavra-chave especificada foi “Cáceres-MT” e a escala (14), por melhor se adequar ao recorte em estudo. Cabe ressaltar que a escala utilizada não significa a escala sobre as projeções cartográficas conhecidas. Essa, refere-se ao grau de proximidade sobre uma superfície a ser modelada ou animada (12).

Em seguida, ao pressionar a tecla “E” será executado o recorte da área de estudo segundo o quadrante exibido na tela (13). Posteriormente é obtido o modelo digital de informações MDE pelo site da Nasa, pois a biblioteca Add-on do Blender tem conexão com a base de dados SRTM, permitindo assim vincular a rugosidade do relevo e a camada com a imagem de satélite.

Para a construção da camada de satélite unida ao MDE foi necessário clicar novamente na aba GIS, selecionar o item *web geodata* e escolher a opção *Get a SRTM* (14).

Após finalizado o processo notou-se presença de rugosidade do relevo. Porém, não de forma tão expressiva. Para deixá-la ainda mais visível foi necessário aplicar maior força sobre a função *displace geometry*. E para obter essa respectiva função, tornou-se necessário selecionar as opções *Modifier Properties* e *Strength* e substituir o valor 1.000 para 5.000 (15).

O próximo passo resultou na criação de um plano depois de pressionar no teclado as teclas (Shift+A) e exibir uma aba para adição de objetos. Neste momento foi selecionado a primeira opção *Mesh*, e posteriormente, a opção (*Plane*), localizado na aba que sucede ao deslocar o ponteiro do *mouse* (16).

Após seguido tais passos permitiu-se ampliar o plano, a convergir com a área topográfica gerada nos passos 14 e 15. Em sequência, a tecla (S) foi pressionada e o Mouse deslocado para os lados até se obter o tamanho desejado. Foi necessário acrescentar a tecla (X ou Y) para obtenção correta da área de estudo (ex: S + X), apontado na imagem (17).

Posterior a tais passos, clicou-se na aba superior direita “*Transform*” para configurar a altura inicial e final da animação sobre o plano. Do mesmo modo, para o plano que representa a área de estudo (relevo) também foi configurado a altura para obter melhor representação de inundação da planície. Segundo Nóbrega e Silva (2016, p. 554) é necessário que haja ajustes para calibrar entre a maior e menor altura, por exagero vertical. Após seguir as instruções metodológicas propostas pelos respectivos autores, os valores para a construção da animação corresponderam aos dados coletados na régua da Marinha, na Agência

Fluvial de Cáceres, conforme indicado nas imagens (18 e 19). Não foi possível saber o valor da base (em metros) constituindo valor mínimo equivalente a zero (0) em referência ao nível do mar.

Deste modo, o relevo foi calibrado conforme a menor e maior altura do MDE utilizado como base. E depois realizou-se a sobreposição do plano. Neste momento foi necessário criar a animação vertical do plano para modelar a inundação nas áreas de estudo e desenvolver a estrutura de animação com espaço-tempo simulado. A simulação foi finalizada através da admissão dos valores mínimos e máximos da altura do rio Paraguai, dados fornecidos pela régua fluviométrica da Marinha do Brasil, na baía do Malheiros, no período de 2008 a 2018, num período de onze (11) anos. Foi necessário usar a *timeline* do Blender, localizada no centro inferior de *layout* do mesmo. No *frame 0* foi definido o valor de inundação inicial e no *frame 10* o final, conforme a imagem (20).

Para o registro da posição das camadas necessitou salvar a posição de cada objeto (relevo e plano) na *timeline*, através da tecla (I), que insere uma *keyframe* de posicionamento do objeto. Em seguida, sobre a aba que surgiu foi necessário escolher a opção *LocRotScale*, que representa abreviação de Location, Rotation e Scale, conforme indicado na imagem (21).

O procedimento final que demonstra uma melhor apresentação da modelagem do relevo foi seguido da seleção da opção *Material Properties*. E na opção *Specular* reduziu-se de 0,500 para 0,100. Esta redução permite eliminar o excesso de brilho sobre a modelagem e a impressão de espelhamento. Após finalizar esse procedimento (depois de selecionar o plano da água e a opção *Material Properties*, em *Base Color*) foi selecionado a cor Azul para melhor representação, conforme indicado nas imagens (22 e 23).

O procedimento final consistiu em renderizar os frames. Para isto foi necessário seguir as opções localizadas no canto superior à esquerda do computador, selecionar a terceira aba, *Render*, e escolher a opção *Render Animation* (Ctrl+F12).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A simulação tridimensional constitui-se a representação topográfica da área de estudo que corresponde a três compartimentos: a foz dos rios Sepotuba e Cabaçal com o rio Paraguai, a baía do Malheiros, e o Pantanal de Cáceres, na altura do Ilha Taiamã. Foi possível identificar o regime de inundação desses compartimentos em decorrência da sazonalidade de cheia e estiagem.

O rio Paraguai passa por diferentes sistemas de inundação que caracterizam sua dinâmica. Conforme os autores mencionados abaixo, esta dinâmica apresenta-se por “quatro períodos hidrodinâmicos, sendo os picos de Cheia entre janeiro - março, período de Vazante, entre julho – setembro, com intervalos de Enchimento (outubro - dezembro) e Esvaziamento (abril – junho)” (Leandro; Nascimento; Souza, 2017, p. 5979).

Através de dados coletados na Agência Fluvial de Cáceres – Marinha do Brasil e comparados com os níveis de vazão das estações fluviométricas, notou-se que os intervalos correspondem ao ápice do volume de água, o que corresponde a cheia entre Março – Abril, com posterior vazante entre Maio – Agosto. Seca, entre Setembro – Outubro. E enchente, que corresponde a resposta das chuvas na região, entre Novembro – Fevereiro.

Em onze anos (2008 - 2018), referente ao período de enchente, o nível mínimo correspondeu a 0,82 m no ano de 2012, enquanto o nível máximo aferido foi de 5,72 m registrado em 2014. No período de cheia, o nível mínimo foi equivalente a 2,91 m em 2016 e o nível máximo foi de 5,97 m, também em 2014.

Nos períodos que correspondem ao menor volume de água regional, o intervalo de vazante apresentou nível mínimo de 0,81 m em 2016 e o nível máximo foi registrado em 2014 com 4,38 m. Na seca, o nível mínimo aferido pela Agência Fluvial de Cáceres foi de 0,70 m em 2013 e o máximo de 1,78 m em 2014, demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1. Nível do rio Paraguai na baía do Malheiros (2008-2018).

Ano	Enchente			Cheia			Vazante			Seca		
	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo	Mínimo	Médio	Máximo
2008	1,17	2,83	4,95	3,68	4,19	4,58	1,11	1,99	3,62	0,97	1,15	1,50
2009	1,52	2,41	3,35	3,56	4,12	4,81	1,05	1,91	3,83	1,02	1,20	1,68
2010	1,22	2,75	5,68	3,22	4,12	5,39	1,10	1,74	3,12	0,92	1,22	1,76
2011	1,07	2,24	4,86	3,88	4,86	5,40	1,16	1,89	3,72	0,97	1,07	1,27
2012	0,82	2,29	3,58	3,18	3,78	4,29	0,94	2,02	3,42	0,80	0,98	1,24
2013	1,02	2,39	4,32	3,22	3,93	4,34	0,92	1,79	3,12	0,70	1,05	1,32
2014	1,47	3,03	5,72	4,28	5,00	5,97	1,44	3,08	4,38	1,04	1,29	1,78
2015	1,24	2,66	4,46	4,04	4,38	4,82	1,14	2,62	4,32	0,86	1,11	1,34
2016	1,04	2,62	4,17	2,91	3,86	4,35	0,81	1,63	2,84	0,82	0,98	1,18
2017	1,10	2,91	5,16	4,24	4,59	5,58	1,23	2,51	4,36	0,90	1,11	1,34
2018	1,52	3,36	4,80	3,94	4,49	4,96	1,16	2,30	3,88	1,15	1,38	1,64

Legenda: Nível mínimo do rio no período
 Nível máximo do rio no período

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Deste modo, identificou-se que em 2014 houve o maior volume de água entre todos os períodos analisados de (2008-2018) e apresentou pico no período da cheia com 5,97 m. Enquanto que os níveis mínimos foi apresentado em anos distintos, registrando o menor valor em 2013 sobre a sazonalidade de seca com 0,70 m. No entanto, trabalhou-se com a hipótese apenas de dois períodos, sendo-os de seca (março a outubro) e cheia (novembro a fevereiro), na modelagem das áreas de estudo.

Conforme a Tabela 1 apresenta, pode-se afirmar que na sazonalidade da estiagem os valores médios do volume de água no rio e na planície não ultrapassam dois metros de altura, acompanhado por um período de transição, que corresponde a variação do volume hidrológico entre enchente e vazante, que oscila com valores superiores a dois metros e inferior a três metros. E no período de cheia, possui valores superiores a quatro metros.

Os valores apresentados no Modelo Digital de Elevação, combinado com a ferramenta de animação por meio de interpolação vertical, proporcionou a visualização do comportamento de inundação na planície do rio Paraguai. A visualização ocorre por meio do *frame* (posição da animação) que indica a posição (altura) da massa água em relação ao relevo. Inicialmente é representado o nível mais baixo, que corresponde a sazonalidade da estiagem regional, enquanto que o último *frame* exibe a inundação sobre a altura máxima registrada em relação ao relevo.

Na área de estudo que corresponde à confluência do rio Sepotuba e o rio Cabaçal com o rio Paraguai, a altimetria mínima que representa os canais fluviais registrou 100 metros subtraídos pela altura média do rio Paraguai, ou seja, 2,25 metros. Deste modo, para este recorte espacial, o valor mínimo adotado foi de 97,44 metros em relação ao nível do mar. A Tabela 1 representa a altura da régua em metros, que permite a leitura do nível do rio. Enquanto que a altura da água corresponde à altura do relevo, somado à altura da régua. Já o incremento, corresponde apenas ao nível de inundação da planície, onde 0% corresponde ao período de seca até alcançar 100%, ou seja, período de cheia.

A altura mínima constatada pela Agência Fluvial de Cáceres representa no frame 1 o equivalente a 98,14 m (97,44 m + 0,70 m), mínima de altura do rio na seca, ou seja, 0% ou nível de base mínimo de incremento de volume de água. Os valores seguem baixos, mas com acréscimo na altura do rio até o frame 3, com altimetria de 98,69 m (96,94 m + 1,75 m), que representa aumento na vazão e volume do rio. Os frames que apresentam valores inferiores a 2 metros da altura da régua representam o período de seca.

Os valores apresentados acima de 2 metros e inferiores a 4 metros representam a transição sazonal durante o ano, entre os períodos de seca e cheia. Constatou-se que a transição ocorreu no frame 4, registrando massas d'água com altimetria de 99,27 m (96,99 m + 2,28 m), seguindo até o frame 7 com altimetria de 101,55 (97,69 m + 3,86 m).

As maiores altimetrias são registradas a partir do frame 8, com 102,27 m (97,88 m + 4,39 m), que segue recebendo volume dos afluentes a montante e inundando a planície. Conforme é registrado pela Agência Fluvial de Cáceres, o nível do rio Paraguai alcançou máxima de 103,41 m (97,44 m + 5,97 m), que representa no frame 11, 100% de incremento de volume a partir da movimentação vertical de inundação. A equidistância média de altimetria entre um frame e outro foi equivalente a 0,479 m, conforme apresentado na Tabela 2.

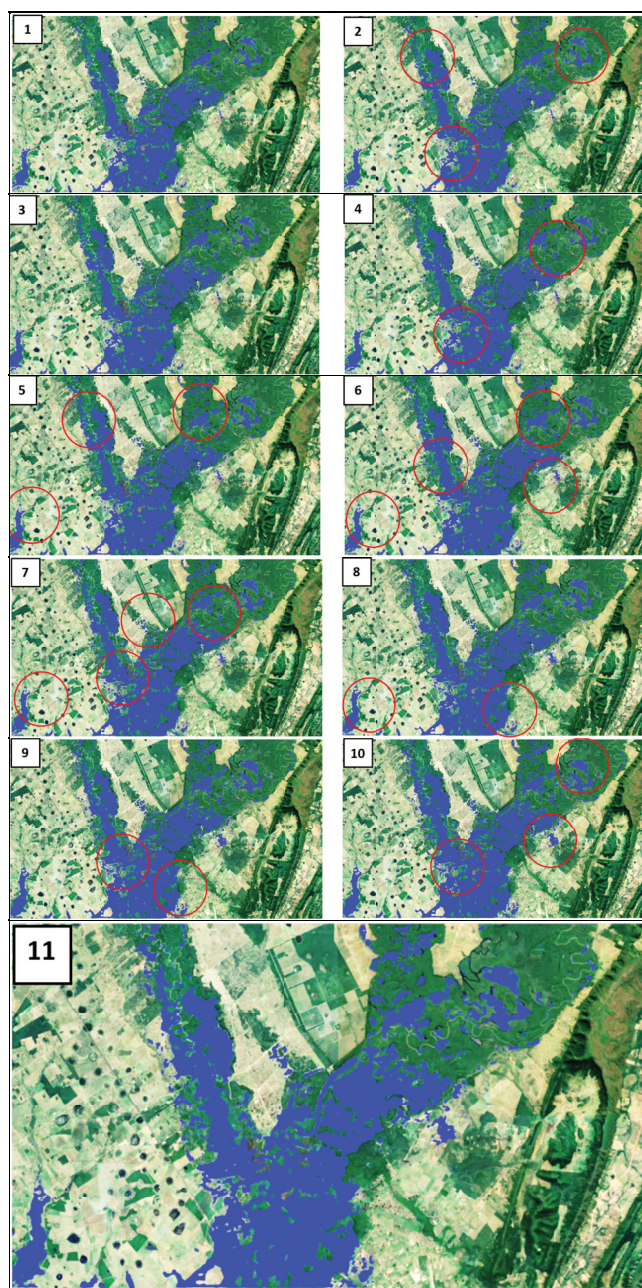
Tabela 2. Confluência dos rios Sepotuba e Cabaçal com o rio Paraguai.

	Período de seca			Transição sazonal entre seca e cheia				Período de cheia			
	Frame 1	Frame 2	Frame 3	Frame 4	Frame 5	Frame 6	Frame 7	Frame 8	Frame 9	Frame 10	Frame 11
Altura da régua (m)	0,7	1,23	1,75	2,28	2,81	3,34	3,86	4,39	4,92	5,44	5,97
Altura da Água (m)	98,14	98,29	98,69	99,27	99,99	100,78	101,55	102,27	102,86	103,26	103,41
Incremento (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

A seguir é apresentada a transição de frames que demonstra o corredor fluvial e a planície do rio Paraguai saindo do período de seca (águas baixas), conforme representado nos frames 1 a 3. A transição sazonal, altimetrias médias acima de 2 m e inferior a 4 m, são representados nos frames de 4 a 7. E por fim, o período que corresponde às maiores altimetrias e inundação do canal para a planície, todas acima de 4 m, conforme demonstrados nos frames de 8 a 11.

Cabe enfatizar que os valores apresentados não decorrem de apenas um ano, mas da média anual ocorrida num período de 11 anos (2008 - 2018), conforme destacado. Em relação às imagens de satélite, correspondente a área de estudo, cabe afirmar que representam imagens recentes, de (2019 - 2020), adquiridas do *basemap* da Nasa e demonstradas na Figura 3).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Figura 3. Frames do modelo tridimensional de inundação (rios Sepotuba, Cabaçal e Paraguai).

Observa-se, ao comparar os frames, que do período de seca para o de cheia, ocorreu expansão de forma horizontal, ou seja, houve inundação do corredor fluvial, alcançando também a planície. No entanto, a expansão horizontal só é visível a partir do frame 4, quando indica que antes de a planície se estender ocorreu a verticalização por acúmulo do volume de água nos canais fluviais, baías e lagoas. A evolução da inundação verifica-se na descrição dos frames abaixo.

O frame 1 demonstra o estado inicial da modelagem tridimensional. A menor altimetria do rio aferida por meio da régua fluvial apresenta apenas 0,70 m. O frame 2 em relação ao frame 1 apresenta incremento gradativo do volume de água, com inundação de lagoas ou baías na confluência do rio Sepotuba com o Paraguai. Também ocorre a inundação dessas feições no baixo curso do rio Cabaçal

e em sua confluência com o rio Paraguai. Essas alterações são identificadas através de circunferências em vermelho no corredor fluvial, conforme apresentado nas imagens da (Figura 3).

O frame 3 não demonstra inundação horizontal sobre a planície. Assim, pode-se considerar que a ocupação das águas ocorre de forma vertical, dando profundidade aos corpos hídricos.

O frame 4 demonstra inundação horizontal com altimetria da água em 99,27 m. Nota-se inundação do canal secundário, na confluência do rio Sepotuba com o Paraguai. Na planície de inundação, à esquerda de montante (N) a jusante (S), observa-se a formação de uma baía maior que as outras que foram formadas no corredor fluvial. Registra-se inundação em baías no rio Paraguai, após a confluência com o rio Cabaçal e também na planície de inundação a noroeste.

De acordo com estudos de Lima (2018), no baixo curso do rio Cabaçal as alterações morfológicas espaço/temporal ocorrem pela dinâmica fluvial e sedimentar, que podem ocasionar desaparecimento ou surgimento de feições. Enquanto que na planície fluvial, a autora considera que as atividades humanas são os principais fatores de alterações do espaço, por exemplo, desmatamento e retirada de barro, que impulsionou a movimentação vertical do lençol freático, fazendo surgir lagoas que são abastecidas de forma difusa.

No frame 5 ocorre a diminuição de inundação horizontal em vários pontos. Sendo assim, verifica-se que houve comportamento de inundação no rio Paraguai, acima da confluência do rio Sepotuba. Nota-se a ocorrência de inundação vertical na planície de inundação a esquerda, e também, na confluência entre os rios Cabaçal e Paraguai, com inundação de várias baías e lagos dentro do corredor fluvial.

O frame 6 indica inundação em apenas quatro locais: acima da confluência do rio Sepotuba com o rio Paraguai, na planície de inundação a esquerda, no baixo curso do rio Cabaçal, e em sua planície de inundação, a direita do corredor fluvial.

No frame 7 a animação apresenta ocorrência de inundações no centro do canal fluvial, a montante da foz do rio Sepotuba. Verifica-se também a ocorrência de inundação na planície a esquerda. A planície a direita, antes da confluência com o rio Cabaçal, também começa a haver inundação. No baixo curso do rio Cabaçal ocorre inundações de baías. Após a confluência com o rio Paraguai, nota-se a presença de inundação próximo ao canal fluvial, tanto a esquerda quanto a direita. Além disso, é possível verificar maior volume de água na planície de inundação a Oeste.

No frame 8 registrou-se altitude da água em 102,27 m. Neste ponto, as maiores alterações observadas referem-se ao aumento do volume de água vertical, ou seja, as cavidades preenchidas com água se tornaram baías e lagoas ganhando profundidade. As inundações horizontais ocorrem em dois pontos na planície de inundação: a esquerda, ao lado do corredor fluvial e um pouco mais a jusante na foz do Cabaçal, e na planície a direita.

No frame 9 verifica-se a ocorrência de mudanças em dois pontos: a primeira, sobre a planície de inundação a esquerda, e a segunda, exatamente na confluência do rio Cabaçal. No frame 10, nota-se maiores inundações a montante da foz do rio Sepotuba, na baía localizada na planície de inundação a esquerda. E, mais uma vez, ocorre a expansão na foz do rio Cabaçal. Por fim, no frame 11, registra-se o valor máximo de inundação em 103,41 m e não apresentou mudanças na inundação horizontal.

Paula (2019, p. 74) registra que houve redução e surgimento de feições morfológicas no corredor fluvial do rio Cabaçal e associa que esta dinâmica das feições está associada “a variações pluviométricas devido queda no índice de precipitação”. O autor considera que a dinâmica fluvial do canal, potencializada pela ação antrópica, resultou na transformação da paisagem.

Sobre a potencialidade da ação antrópica como fator de pressão sobre o ambiente, Félix (2018, p. 19) considera ser uma “desconformidade da relação do uso da terra e as características ambientais”, que segundo o autor, apresenta sinais claros de esgotamento dos recursos naturais e desequilíbrio. Tais fatos, resultam em uma fonte de “grande quantidade de sedimentos para o bioma Pantanal”. E se esses sedimentos forem transportados para os cursos d’água, sobrecarregando a rede de drenagem, favorece o transbordamento das águas confinadas nas calhas para a planície pantaneira.

A dinâmica pluviométrica integra parte da dinâmica fluvial na área de estudo e tem como variável a iminência de inundação, como “a quantidade de precipitações (volume), os regimes sazonais ou diários dessas precipitações, ou seja, sua distribuição temporal e a intensidade das chuvas individuais (volume e duração)”. Deste modo, ocorre no período das chuvas, o “transbordamento da água e dos sedimentos para a planície no baixo curso, favorecendo o alagamento periódico da planície, além de contribuir para o abastecimento de lagoas e baías”, afirma os autores (Souza; Cunha; Sousa, 2019, p. 780).

A foz do rio Cabaçal com o rio Paraguai é o local que demonstrou maior inundação sobre a evolução espaço-tempo por interpolação na animação. Os frames demonstraram a ocorrência de diversas mudanças na foz e no baixo curso do Cabaçal, o que pode estar relacionado com o baixo gradiente topográfico do rio Cabaçal. Lima (2018), após realizar pesquisas de levantamento temporal de várias feições morfológicas no baixo curso do rio Cabaçal, relata o surgimento de várias lagoas. Conforme a autora, algumas delas se justificam por questões geoambientais e baixo gradiente, enquanto outras, surgiram por causa da supressão da vegetação ou por atividades antrópicas.

Félix (2018) afirma que a respectiva área dispõe de dois aquíferos (Araras e Pantanal), os quais, contribuem para a alimentação dessas feições. O autor admite a existência de alta porosidade, que facilita carga e recarga tanto do aquífero quanto dos corpos hídricos.

Os autores Santos e Stevaux (2017) afirmam que a concentração de inundação na confluência do rio Cabaçal com o rio Paraguai ocorre da seguinte maneira: o fluxo do canal principal e os sedimentos depositados no curso hídrico, somados a topografia da calha, ou seja, zona de escavação e área de deposição, funcionam como barragens para as águas do tributário. Assim, a água retorna ou acumula criando inundações em áreas de planícies.

Ainda sobre o mesmo assunto, os autores Leandro e Souza (2012) consideram que:

A fração de areia encontrada na confluência aumenta com o processo de sedimentação promovido por refluxo exercido pelo rio Paraguai associado às baixas declividades deste com os afluentes, característico de área de planície. No período de estiagem, o volume de água diminui gradualmente, o que contribui para obstrução do segundo canal do rio Cabaçal onde cordões arenosos de granulometria fina são formados por acresção lateral e depósitos de fundo na foz do afluente (Leandro; Souza, 2012 p. 270).

A segunda área de estudo encontra-se localizada sobre o perímetro urbano da cidade de Cáceres, entre a ponte Marechal Rondon e a baía da Palha. A altimetria do relevo deste trecho corresponde a 92, 44 m. Segundo dados coletados pela Agência Fluvial de Cáceres – Marinha do Brasil, o valor mínimo da altimetria da água constatado foi de 93, 14 m (92, 44 m + 0, 70 m) na sazonalidade de seca. E no período de cheia, o valor máximo foi equivalente a 98, 41 m (92, 44 m + 5, 97 m), demonstrado na Tabela 3.

Quanto ao período de seca, os dados corresponderam à animação demonstrada nos três primeiros frames acima. Nos frames 4 a 7, denominam-se transição sazonal. E nos frames de 8 a 11 representam o período de cheia, com volume de água superior a quatro (4) metros (Tabela 3).

Tabela 3. Ponte Marechal Rondon a baía da Palha.

	Período de seca			Transição sazonal entre seca e cheia				Período de cheia			
	Frame 1	Frame 2	Frame 3	Frame 4	Frame 5	Frame 6	Frame 7	Frame 8	Frame 9	Frame 10	Frame 11
Altura da régua (m)	0,7	1,23	1,75	2,28	2,81	3,34	3,86	4,39	4,92	5,44	5,97
Altura da Água (m)	93,14	93,29	93,69	94,28	94,99	95,77	96,55	97,27	97,86	98,26	98,41
Incremento (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

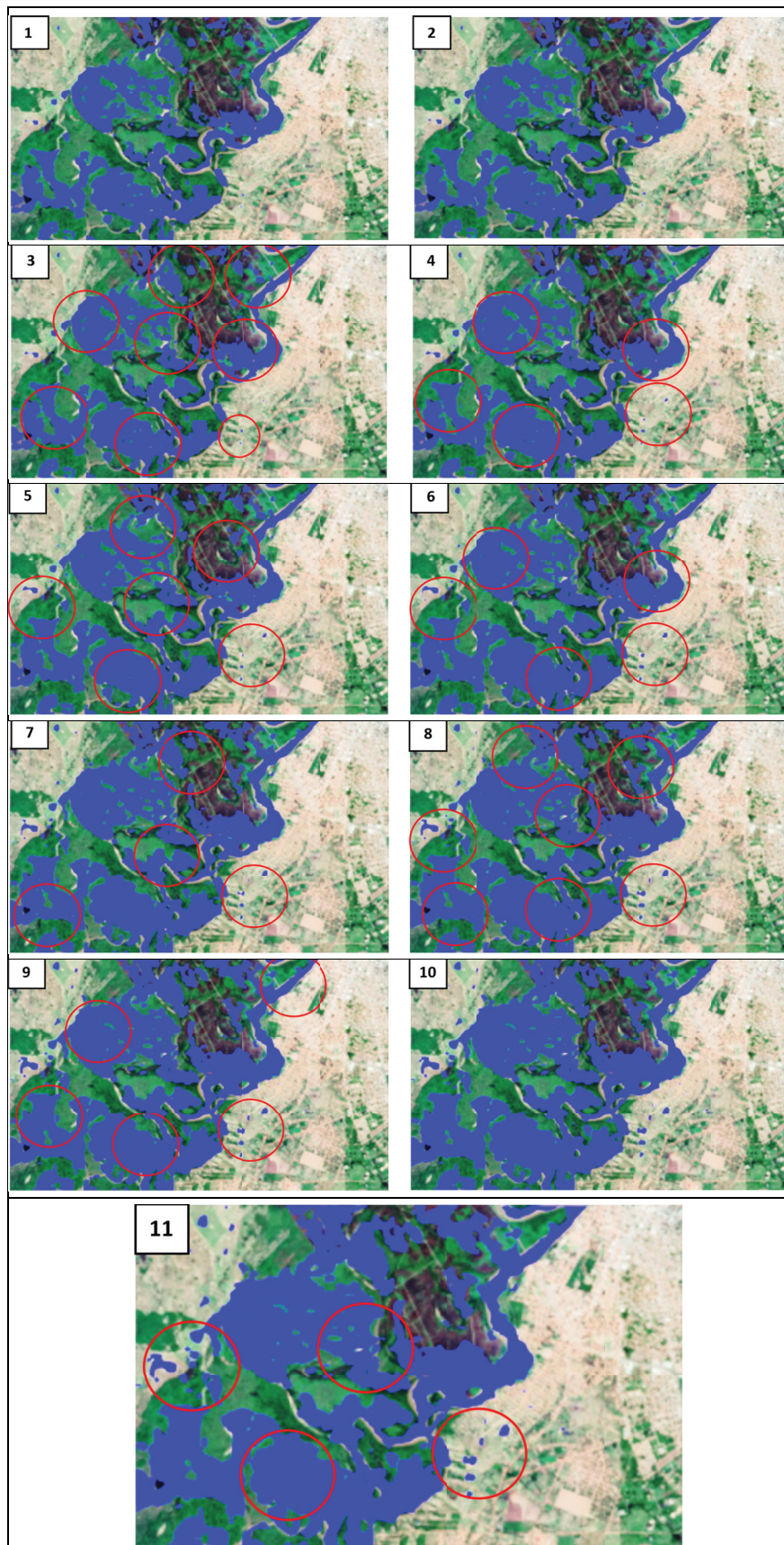
Os valores apresentados acima demonstram a altimetria do relevo somada à altimetria registrada na régua fluvial. Os valores resultam do valor médio aferido em onze 11 anos (2008 - 2018), enquanto que a altimetria do relevo foi compatibilizada com os modelos topográficos registrados nos MDE - Modelos de Elevação.

Ao observar e comparar a evolução da inundação no respectivo trecho analisado, notou-se a evolução do volume das formas aquosas em todo o corredor fluvial e na margem esquerda, que se localiza na cidade de Cáceres, o que significa que o perímetro urbano é afetado por inundações. Segundo Cruz (2016), nos córregos em perímetro urbano são registrados vários impactos em função da urbanização, por exemplo, a retirada da vegetação ciliar, o aterramento do leito maior e da planície de inundação. Tais impactos resultam em inundações de parte da cidade na sazonalidade de cheia. Abaixo, segue a descrição da evolução de inundação na área de estudo, conforme demonstrado nos frames.

Os níveis modelados na animação correspondem a altimetria mínima de 93,14 m (92,44 m + 0,70 m) que se referem ao período sazonal de seca na região, representando porcentagem com 0%. Enquanto que a maior altimetria registrada é de 98,41 m (92,44 m + 5,97 m), representando porcentagem em 100%. A equidistância média de um frame para outro correspondeu a 0,479 m.

A área em estudo (modelada e animada) corresponde a todo o canal fluvial do rio Paraguai, que se encontra no perímetro urbano de Cáceres, com planície de inundação dos lados direito e esquerdo. A animação vertical demonstra inundações horizontais sobre quase todo o canal fluvial e no período de cheia existem áreas dentro da cidade que ficam sujeitas a inundação.

Observa-se no frame 1 que a calha do rio Paraguai se encontra coberta de água, apesar de ter altimetria de 0,70 m. E apresenta áreas inundadas em todo o canal fluvial. O frame 2 não demonstrou alterações, mesmo com acréscimo de 0,15 m. Deste modo, identifica-se a presença de inundações a partir da altimetria 93,69 m, conforme representado no frame 3 (Figura 4).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Figura 4. frames do Modelo Tridimensional de Inundação (Ponte Marechal Rondon à baía da Palha).

Pode-se afirmar que toda a área de estudo apresenta alterações com inundações de pequenos lagos e incremento de volume nas baías. Na planície de inundação à esquerda, ocorre surgimento de dois lagos, enquanto que na planície à direita, os lagos existentes aumentam de diâmetro.

No frame 4 nota-se inundação horizontal em quase todas as baías circuladas e apresentadas na Figura 4. Na margem a esquerda, que corresponde ao perímetro urbano de Cáceres, verifica-se o surgimento de dois novos lagos, totalizando quatro. No frame 5 é apontado maior quantidade de água em baías e lagoas existentes, inclusive naquelas que se encontram localizadas no perímetro urbano. Assim, observa-se o surgimento de três novos lagos, bem próximos a oeste do corredor fluvial.

O frame 6 demonstra aumento do volume de água na porção norte do corredor fluvial, também a oeste, sul e sudeste. E apresenta altura de 96,55 m. O frame 7 demonstra alta concentração de inundação, na planície de inundação à esquerda. Neste referido ponto, nota-se a expansão da água sobre áreas com residências.

No frame 8 identifica-se (em todo o corredor fluvial e na planície de inundação à direita) a presença de lagos conectando-se às baías. Nota-se, também, grande expansão horizontal de inundação nas áreas alagadas. Na planície à esquerda, dentro da cidade, verifica-se mais uma lagoa.

No frame 9 ocorre a expansão de todas as áreas inundadas, havendo ainda mais conexões entre lagos, corredor fluvial, planícies e baías. A água, segundo a animação interpolada na modelagem do relevo, não apresenta transformações horizontais na paisagem, mede-se 98,26 m de altimétrica. A animação ocorre de forma vertical e é limitada pela rugosidade do relevo na imagem obtida pelo MDE.

O frame 10 não apresentou alterações. Por fim, no frame 11, verifica-se uma pequena expansão na área de estudo à norte. No centro (oeste, leste e sul) houve inundações horizontais, com destaque para maior acumulação de água nos lagos das planícies de inundação à esquerda, e na planície, à direita.

No período de cheia do rio Paraguai há o risco de inundação na cidade de Cáceres. Tal ameaça se relaciona ao fenômeno de contracorrente, que segundo Cruz (2018, p. 108), corresponde a “baixa declividade no baixo curso de alguns afluentes”. O autor considera que os canais urbanos no período de cheia, sobre influência do potencial hidráulico do rio Paraguai, proporcionam a “propagação” e o retorno do volume de água para os “afluentes em alguns quilômetros”. Este retorno, pode implicar no abastecimento completo do canal fluvial de escoamento desses afluentes, que através do acúmulo de água, podem se estenderem externamente ao canal, ocasionando inundações de ruas e casas nas proximidades dos canais (Figura 5).



Fonte: Arquivo pessoal do Eng. Adilson Reis (2007 *apud* Vendramini, 2017).

Figura 5. Registros fotográficos de inundações no Centro da cidade de Cáceres – MT (15 de janeiro de 2007).

Cabe destacar que os riscos de inundação no perímetro urbano de Cáceres advêm de sua “distribuição altimétrica bem uniforme, características comuns da planície pantaneira”. Ou seja, predomina na cidade o relevo plano, apresentando suaves rugosidades próximos aos cursos hídricos, que podem proporcionar inundações em consequência da geomorfologia, após fortes precipitações, conforme considera (Vendramini, 2017, p. 46). O referido autor ainda considera que as características geomorfológicas da cidade demonstram “grau de vulnerabilidade a enchente com áreas de riscos associadas a precipitação mais intensa na região central”, indicando também, risco nos bairros Jardim Imperial e Paraíso, conforme o levantamento topográfico realizado pelo mesmo (Vendramini, 2017, p. 46). Conforme observado na animação, as áreas que acomodam superfícies inundadas ocorrem na borda sudoeste em direção ao centro, isso levando em consideração, como ponto de partida, as margens do rio Paraguai, e concretizam as áreas sujeitas a inundação no perímetro urbano da cidade de Cáceres.

Vendramini (2017) afirma que na cidade de Cáceres já ocorreu eventos extremos de inundação. A primeira aconteceu em 1998, que respondeu a precipitações locais de 121 mm. E a segunda, no mesmo ano, com níveis de 116,20 mm de chuva. Em 2007 também foi registrado inundação, com chuva de 86,60 mm. O último evento considerado extremo ocorreu em 2010, com chuvas intensas que somaram 159,40 mm, o maior volume pluviométrico aferido na história da estação meteorológica local (instalada pelo INMET).

Segundo levantamento documental feito pelos autores Paula, Santana e González (2018), os eventos extremos podem ocorrer com 80 mm de precipitação sobre tempo de concentração de 24h. Deste modo, o valor apresentado se encaixa na classe “Chuva muito forte”, definido por Monteiro e Zanela (2014, p. 5), que analisaram a acumulação diária de chuva na cidade de Fortaleza-CE. Os autores destacam ainda que consideram “Chuva extrema” a partir de 116,6 mm. Também em estudos realizados na cidade de Belém do Pará, Bastos *et al.* (1998) afirmam que as inundações, por eventos extremos, ocorrem com 136 mm.

A realidade das inundações ocorridas no perímetro urbano da cidade de Cáceres e da planície de inundação a Oeste da cidade estão diretamente ligadas ao fator Geomorfológico, ou seja, de relevo suave ondulado. De acordo com o Plano Diretor da cidade (Cáceres, 2010), o avanço das águas sobre habitações ocorre por causa da construção de residências em locais inapropriados. Tais ações desencadeiam problemas de alagamento pela ação direta do homem sobre os canais de drenagem.

As ocorrências temporais de inundação, segundo levantamento realizado por Paula, Santana e González (2018), podem ocorrer com 80% de probabilidade no período de um ano e três meses. Pode ocorrer casos de inundação na cidade devido às condições estruturais naturais da área de estudo, mas que podem ser agravados devido à presença antrópica com a falta de infraestrutura de escoamento das águas pluviais (Cáceres, 2015).

A terceira e última área de análise corresponde à planície pantaneira de Cáceres, na altura da reserva ecológica da ilha Taimã. Apresenta 81 metros de altitude subtraído pela altura média do rio Paraguai de 2,26 m, assim, considerando a altura de referência para a animação de 78,44 m. Deste modo, considerou-se a altura mínima com 97,14 m ($78,44 \text{ m} + 0,70 \text{ m}$) para o período de seca e 84,41 m ($78,44 \text{ m} + 5,97 \text{ m}$), com equidistância média de 0,479 m.

Os frames 1 a 3 correspondem a altura do rio Paraguai no período de seca, seguidos pela transição sazonal, que corresponde aos frames 4 a 7, por fim, apresentando nos frames 8 a 11 o período de chuvas regionais. Esses dados foram aferidos e resultantes sobre a média da altura do rio Paraguai, no período de corresponde de 2008 a 2018.

Observa-se, ao comparar os frames, que a inundação horizontal ocorre de forma expressiva nas bordas norte, leste e oeste da área estudada. Isto significa que na porção central e sul encontra-se bem úmida e inundada, devido baixa declividade, assim, não ocorre a expansão horizontal. No entanto, acontece o incremento do volume das superfícies mais baixas, aumentando a massa d'água de forma vertical, o que caracteriza área pantaneira.

O segmento analisado (planície pantaneira de Cáceres, na altura da reserva ecológica da ilha Taimã) diferencia-se dos demais, pois ao realizar a análise da área verificou-se que ocorre do lado esquerdo do rio Paraguai o contato da planície e pantanal de Cáceres com a planície e Pantanal do município de Poconé. Ainda assim, foi avaliado a inundação, por fazer parte do quadrante em estudo, pois o Software de animação não é um SIG, o que impossibilitou a extração correspondente ao Pantanal de Poconé (Tabela 4).

Tabela 4. Pantanal de Cáceres: Ilha Taiamã.

	Período de seca			Transição sazonal entre seca e cheia				Período de cheia			
	Frame 1	Frame 2	Frame 3	Frame 4	Frame 5	Frame 6	Frame 7	Frame 8	Frame 9	Frame 10	Frame 11
Altura da régua (m)	0,7	1,23	1,75	2,28	2,81	3,34	3,86	4,39	4,92	5,44	5,97
Altura da Água (m)	79,14	79,29	79,69	80,28	80,99	81,77	82,55	83,27	83,86	84,26	84,41
Incremento (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

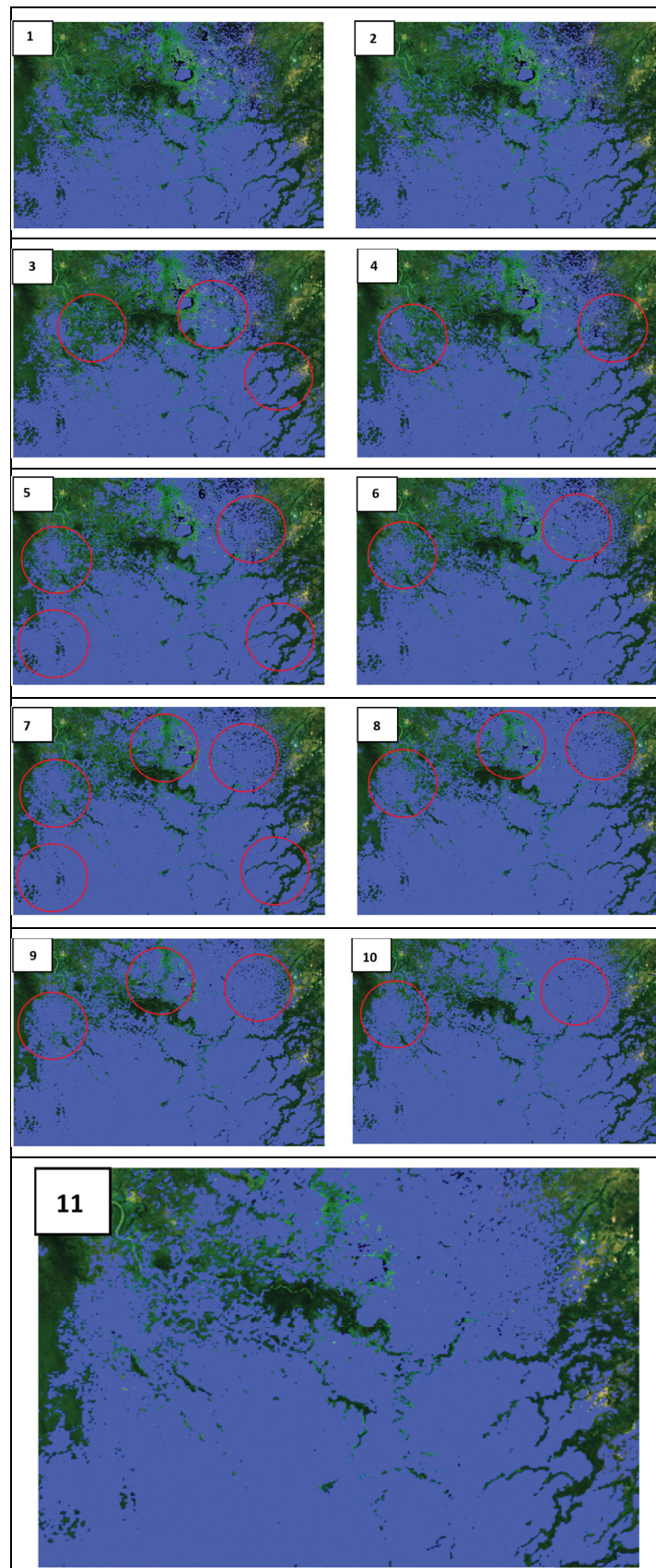
Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Na respectiva área analisada verifica-se a evolução de inundação e demonstra a altura do relevo, acrescentando-se a altura do rio registrada na régua fluvial. O frame 1 demonstra o estado inicial referente ao período de seca na planície pantaneira, com 79,14 m (relevo com 78,44 m + altura do rio 0,70 m). No frame 2 não apresenta alteração na inundação horizontal. No entanto, a partir do frame 3, correspondente à altura de 79,69 m, identificou-se inundações nas imediações da ilha Taimã e nas extensões norte e nordeste da planície pantaneira, que pertence ao Pantanal de Poconé.

No frame 4 verifica-se maior inundação ao redor da Ilha Taiamã e também a nordeste da área de estudo, que caracteriza o Pantanal do Poconé. O frame 5 demonstra expansão de inundação a oeste e a leste do quadrante em estudo, registrando altura de 80,99 m. Enquanto que no frame 6 o comportamento de inundação é semelhante ao frame 4, com deslocamento horizontal ao redor da Ilha Taiamã e também a nordeste da área de estudo.

O frame 7 apresenta uma totalidade de inundação na área de estudo, marcadas com as esferas vermelhas. Os locais apresentam extravasamento das águas para a planície que dão origem a pequenas baías; esta característica foi analisada pelos autores Infanti Jr. e Fornasari Filho (1998). Assim, verifica-se a existência de aumento de volume na ação vertical do que na horizontal.

O frame 8 demonstra inundações a norte, nordeste e noroeste de baías e pequenas lagoas. No frame 9 verifica-se que são as mesmas áreas de expansão na inundação, exatamente nos respectivos pontos apontados no frame 8. Enquanto que no frame 10 é identificado alteração da inundação na paisagem, nas proximidades da ilha Taimã e no Pantanal de Poconé. Com 84,41 m, correspondendo a 100% de inundação, a animação espaço-tempo não apresentou alterações (Figura 6).



Fonte: Elaborado pelos autores (2020).

Figura 6. frames do Modelo Tridimensional de Inundação (Planície pantaneira de Cáceres e Poconé).

Um fato considerado interessante é que independente das precipitações a montante (quando a vazão atingir este ponto), as águas se espalham de forma homogênea sobre a planície de inundação no Pantanal e não atinge altura para influenciar na completa inundação da ilha Taiamã, ou de pequenos morros, pois o volume espalha-se horizontalmente.

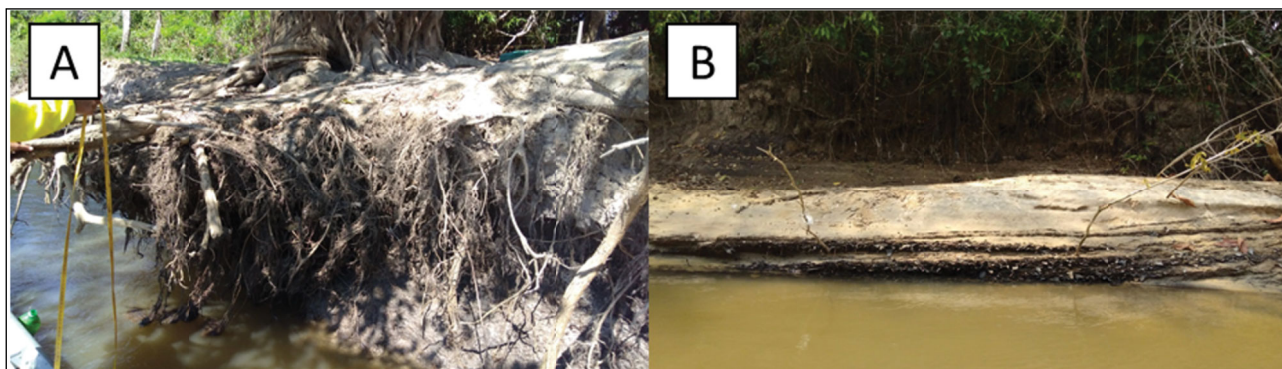
A paisagem apresenta várias ilhas fluviais, com destaque da ilha Taiamã por sua área de (11.000 ha), que abriga a Reserva Ecológica Taiamã, administrada pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade - ICMBio, que trabalha para preservação de onças pintadas e de outros animais. A reserva possui no período de estiagem 90% de sua área inundada ou sujeita a inundação, de acordo com pesquisas de (Souza, 2004).

A Reserva Ecológica Taiamã (2020) compartilha em rede social o modo de vida das onças-pintadas que habitam na região da Estação, demonstrando que através dos dados e monitoramento constante, por meio de colar/GPS:

onças-pintadas [...] permanecem na área mesmo durante a cheia do Pantanal. Como a variação do nível da água é pequeno em Taiamã, devido ao transbordamento da água além da calha do rio, esses felinos conseguem caminhar parcialmente submersos na área da Estação durante o período de cheia (Reserva Ecológica Taiamã, 2020, s.p.).

A caracterização morfológica feita por Souza (2004, p. 9) indicou que no respectivo trecho ocorre a bifurcação do canal principal para o leste, formando um braço que circunda a ilha. A pesquisa da autora também registrou a presença de pequenos córregos e cursos d'água que drenam as suas águas para regiões sujeitas a “inundação, desaguando em baías e lagoas, ou espraçando-se na planície, contribuindo para formar a área de Pantanal”. A autora concluiu que a descarga de sedimentos que desce dos afluentes tem o papel de contribuir para que haja inundações em área pantaneira, visto que nos períodos de menor vazão os sedimentos são depositados na planície de inundação e nos pequenos canais fluviais (assoreamento), proporcionando que as águas transbordem de forma horizontal no período da cheia, pois já não estão mais confinadas sobre os antigos canais que perderam profundidade (Souza, 2012).

Considera-se importante informar que as águas e os sedimentos distribuídos pelo rio Paraguai e por outros pequenos cursos d'água mantêm e nutrem as várias formas fluviais na planície de inundação do Pantanal, abrangendo baías e lagos maiores. A atividade antrópica na área se restringe a navegação. A intensificação de processos erosivos causados pela navegação (Figura 7) resulta em deposição de sedimentação que advêm das margens (assoreamento) e modificam o leito dos canais, deixando-os rasos e formando barras de sedimentação, ações que causam alterações na dinâmica natural de erosão, transporte e deposição das partículas, em decorrência da variação da altura e volume de água sazonal, afirma (Bindandi, 2014).



Fonte: Arquivo pessoal de Cristiane da Silva Lima no rio Cabaçal em 29 de setembro de 2017.

Figura 7. (A) Erosão por solapamento basal; (B) Deposição de sedimentos.

CONCLUSÃO

A animação tridimensional proporcionou identificar inundações horizontais que transbordam para partes da planície de inundação. As áreas que não demonstraram alteração horizontal comportaram-se apenas verticalização por acúmulo do volume de água nos canais fluviais.

Deste modo, o primeiro compartimento, que corresponde à confluência dos rios Sepotuba e Cabaçal com o rio Paraguai, apresentou altitudes respectivamente ao período de estiagem de 98,14 m convergir para a altura máxima registrada de 103,41 m. O segundo compartimento, localizado no perímetro urbano da cidade de Cáceres, entre a ponte Marechal Rondon e a baía da Palha, registrou altitude de 93,14 a 98,41 m. Por fim, o último compartimento, localizado no Pantanal de Cáceres (Ilha Taiamã) configurou altitudes em sazonalidade, entre 79,14 a 84,41 m.

A animação também permitiu desenvolver análises das características de inundação no Pantanal, que se resumem sobre terras periodicamente inundadas durante todo o ano, com baixo gradiente topográfico. A variação do nível da água mostrou-se pequena no entorno da ilha Taiamã, devido ao transbordamento da água além da calha do rio, formando um labirinto de canais sobre terras parcialmente inundadas.

Sugere-se a instalação de uma base de controle pela Marinha do Brasil na Ilha Taimã, pois a régua mais próxima se localiza na fazenda Descalvado e não há registro temporal da altura do rio, determinando uma insuficiência de dados para poder integrá-los na modelagem da paisagem e sua dinâmica fluvial.

A pesquisa também permitiu concluir que existe uma carência no Brasil sobre a utilização do Blender, *software* 3D, para análise do espaço. O uso desse dispositivo é mais utilizado no meio científico por pesquisadores das Ciências Biológicas e da Medicina. No entanto, sabe-se que em outros países existe por meio do dispositivo a representação espacial urbana e de desastres naturais. Apesar de alguns SIGs executarem/desenvolver simulações tridimensionais, o Blender permite, de forma muito simples, a adição dos dados, melhor visualização da inundação sobre dados altimétricos e nível do rio, coletados pela Agência Fluvial de Cáceres – Marinha do Brasil.

Cabe destacar a importância desta metodologia para fins pedagógicos, para o ensino de Geografia, principalmente, com a utilização de modelos tridimensionais para representação espacial. Além disso, também é possível realizar impressão em 3D, com a utilização de impressoras apropriadas, que

permitem demonstrar o relevo, assim, trazendo para conhecimento dos alunos as formas da superfície terrestre de modo tangível, o que muitas vezes se apresentam de forma abstrata.

Portanto, acredita-se que esta pesquisa, pode, inclusive, estimular outros pesquisadores da área de análises ambiental e espacial a se utilizarem deste software (gratuito, com bases de dados também gratuitas) para aplicar modelagens espaciais e desenvolver modelos/mapas tridimensionais.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, E. P. **Aplicação de dados SRTM à modelagem da erosão em microbacias por geoprocessamento**. 2006. 88 p. (INPE-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2006.
- DAMBRÓS, G. Qual o papel das geotecnologias na estruturação de um novo paradigma da Geografia?. **Caderno de Geografia**, v. 30, n. 60, p. 163-171, 2020.
- DENT, D.; YOUNG, A. **Soil Survey and Land Evaluation**. London: George Allen & Unwin (Ed.), 1981. 278p.
- EULITZ, M.; REISS, G. 3D reconstruction of SEM images by use of optical photogrammetry software. **Journal of structural biology**, v. 191, n. 2, p. 190-196, 2015.
- FITZ, P. R. **Geoprocessamento sem complicação**. Oficina de textos, 2018. 159 p.
- FLORINSKY, I. V.; FILIPPOV, S. V. A desktop system of virtual morphometric globes for Mars and the Moon. **Planetary and Space Science**, v. 137, p. 32-39, 2017.
- HARMON, B. A.; PETRASOVA, A.; PETRAS, V.; MITASOVA, H.; MEENTEMEYER, R. Tangible topographic modeling for landscape architects. **International Journal of Architectural Computing**, v. 16, n. 1, p. 4-21, 2018.
- HARMON, B. A.; PETRASOVA, A.; PETRAS, V.; MITASOVA, H.; MEENTEMEYER, R. K. Tangible Landscape: Cognitively grasping the flow of water. **The International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 41, p. 647, 2016.
- MACÊDO, R. J. A.; SURYA, L. Comparação entre modelos digitais de elevação dos sensores SRTM e ALOS PALSAR para análise digital de terreno. **Revista Contexto Geográfico**, [S.L.], v. 3, n. 6, p. 47-55, 6 fev. 2018. Universidade Federal de Alogos. <http://dx.doi.org/10.28998/contegeo.v3i6.6968>. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/ojs2-somenteconsulta/index.php/contextogeografico/article/view/6968>. Acesso em: jun. 2018.
- MORENO, M. A. D.; FRAGUAS, A. C.; ABADÍA, M. F.; SERRANO, C. R.; PARDO-GIL, G. M.; CARBAJOSA, E. A.; SIESO, J. P.; LUDEÑA, S. I.; BARGUEÑO, I. C. Aplicación de nuevas tecnologías en la Arqueología de la Guerra Civil: Los Yesares, Pinto (Madrid). **Virtual Archaeology Review**, v. 6, n. 12, p. 122-136, 2015.
- MORENO, M. A. D.; FRAGUAS, A. C.; ABADÍA, M. F.; SERRANO, C. R.; PARDO-GIL, G. M.; CARBAJOSA, E. A.; SIESO, J. P.; LUDEÑA, S. I.; BARGUEÑO, I. C. Aplicación de nuevas tecnologías en la Arqueología de la Guerra Civil: Los Yesares, Pinto (Madrid). **Virtual Archaeology Review**, v. 6, n. 12, p. 122-136, 2015.
- NÓBREGA, A. E. M.; SILVA, B. L. P. Mapa para análise visual espaço-temporal em design de simulação de cheia no Pantanal. **Anais[...]** 6º Simpósio de Geotecnologias no Pantanal. Cuiabá, MT, 22 a 26 de outubro 2016. Embrapa Informática. Agropecuária/INPE, p. 549 -557.

- OLAYA, V. Sistemas de Información Geográfica. **Libro SIG**, 2011. 911 p.
- ROSA, R. **Introdução ao Geoprocessamento**. Universidade Federal de Uberlândia. Instituto de Geografia. Laboratório de Geoprocessamento. 2013. 142 p. Disponível em: < http://professor.ufabc.edu.br/~flavia.feitosa/cursos/geo2016/AULA5-ELEMENTOSMAPA/Apostila_Geop_rrosa.pdf>; Acessado em: 26 jun. 2019.
- SANTOS, A. M. A. **Modelagem de ambientes 3D usando programas gratuitos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade do Estado da Bahia. Departamento de Ciências Exatas e da Terra, Salvador, 2018. 45 fls : Il.
- VALERIANO, M. M. **Modelo digital de elevação com dados SRTM disponíveis para a América do Sul, São José dos Campos, SP** INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-10550-RPQ/756). 72p., 2004.
- VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2005, Goiânia, GO. **Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, 2005. p. 1-8.
- VALERIANO, M. M. **Modelos digitais de elevação de microbacias elaborados com krigagem**. São José dos Campos, SP: INPE: Coordenação de Ensino, Documentação e Programas Especiais (INPE-9364-RPQ/736). 54p., 2002.
- VALERIANO, M. M. **Topodata**: guia para utilização de dados geomorfológicos locais. São José dos Campos: INPE, 2008. 72 p. IBI: <8JMKD3MGP8W/33EPEBL>. (INPE-15318-RPE/818). Disponível em: <<http://urlib.net/ibi/8JMKD3MGP8W/33EPEBL>>. Acesso em: jun. 2018.
- VALERIANO, M. M.; ABDON, M. M. Aplicação de dados SRTM a estudos do Pantanal. RBC. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 59, p. 63-71, 2007.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topographic modeling of Marajó Island with SRTM data. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 9, p. 53-63, 2008.
- VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F.; ALBUQUERQUE, P. C. G. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 2009, Natal, RN. **Anais[...]**, São José dos Campos, SP: INPE, 2009. v. CD-ROM. p. 1-8.
- VIRTANEN, J. P.; HYYPPÄ, H.; KÄMÄRÄINEN, A.; HOLLSTRÖM, T.; VASTARANTA, M.; HYYPPÄ, J. Intelligent open data 3D maps in a collaborative virtual world. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 4, n. 2, p. 837-857, 2015.