

## **INFERÊNCIA DE PALEOSUPERFÍCIES COM USO DE MODELAGEM DIGITAL DO TERRENO NO ESTADO DO PARANÁ (BRASIL)**

Ricardo Michael Pinheiro Silveira<sup>1</sup>  
Claudinei Tabora da Silveira<sup>2</sup>

**Resumo:** No contexto da aplicação da análise digital do relevo para a interpretação morfocronológica, este estudo apresenta um método proposto para a identificação e mapeamento de paleosuperfícies amparado exclusivamente por Modelo Digital do Terreno (MDT) e parâmetros geomorfométricos. Considerou-se que as maiores elevações residuais num entorno predefinido pela relação têmporo-espacial indicam os níveis de paleosuperfícies e que essas, por sua vez, quando tangenciadas à superfície atual em porções planas, caracterizam remanescentes ou níveis de antigos terraços. A área de estudo contemplou o estado do Paraná, cuja avaliação dos resultados considerou trabalhos prévios de datações geocronológicas, interpretações evolutivas e mensurações de taxas de denudação de longo termo. Os resultados evidenciaram taxas médias de denudação e estimativa da idade de topos e remanescentes erosivos para cada contexto geomorfológico da área de estudo.

**Palavras-chave:** Geomorfometria. Mapeamento geomorfológico. Modelo Digital de Elevação. Geocronologia. Pediplano.

## **INFERENCE OF PALEOSURFACES USING DIGITAL TERRAIN MODELING IN THE STATE OF PARANÁ (BRAZIL)**

**Abstract:** In the context of digital terrain analysis applied to morphocronological interpretation, this paper presents a proposed method for identifying and mapping paleosurfaces based exclusively by Digital Terrain Model (DTM) and geomorphometric parameters. It was considered that the highest residual elevations in a neighborhood predefined by the temporal-spatial relationship indicate the levels of paleosurfaces and that when tangential to the current surface in flat portions they characterize remnants or levels of old terraces. The study area included the state of Paraná, whose evaluation of the results considered previous papers of geochronological dating, evolutionary interpretations and measurements of long-term denudation rates. The results showed average rates of denudation and estimation of the age of erosion tops and remnants for each geomorphological context of the study area.

**Keywords:** Geomorphometry. Geomorphological map. Digital Elevation Model. Geochronology. Pediplain.

## **INFERENCIA DE PALEOSUPERFICIES UTILIZANDO CON MODELADO DIGITAL DEL TERRENO EN EL ESTADO DE PARANÁ (BRASIL)**

**Resumen:** En el contexto de la aplicación del análisis digital del terreno para la interpretación morfocronológica, este estudio presenta una propuesta de método para identificar y mapear paleosuperfícies apoyado por Modelo Digital del Terreno

<sup>1</sup> Universidade Federal de Rondonópolis, ICBS/Geografia, Rondonópolis, Brasil, ricardomichaelps@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-5664-7079>

<sup>2</sup> Universidade Federal do Paraná, Departamento de Geografia, Curitiba, Brasil, claudineits@ufpr.br, <https://orcid.org/0000-0001-6289-6306>

(DTM) y parámetros geomorfométricos. Se consideró que las elevaciones residuales más altas en una área predefinida por la relación espacio-temporal indican los niveles de paleosuperficies y que estas, a su vez, al ser tangenciales a la superficie actual en porciones planas, caracterizan remanentes o niveles de antiguas terrazas. El área de estudio comprendió el estado de Paraná, cuya evaluación de los resultados consideró trabajos previos de datación geocronológica, interpretaciones evolutivas y mediciones de tasas de denudación a largo plazo. Los resultados mostraron tasas promedio de denudación y estimación de la edad de los topes y remanentes de erosión para cada contexto geomorfológico del área de estudio.

**Palabras clave:** Geomorfometría. Cartografía geomorfológica. Modelo Digital de Elevación. Geocronología. Pediplano.

## Introdução

A modelagem digital do relevo, amparada por técnicas geomorfométricas (WILSON e GALLANT, 2000; HENGL e REUTER, 2009), destaca-se no contexto recente pela aplicabilidade no mapeamento de objetos morfográficos e morfodinâmicos, além de convir, de modo crescente, como base teórico-metodológica para diversas aplicações, com horizonte mais amplo na tratativa do relevo – incluindo a morfocronologia.

Desde a estruturação da Geomorfologia, com os preceitos do ciclo davisiano e as discussões pioneiras acerca das teorias de evolução do relevo, até as concepções matemáticas da modelagem conceitual em ambiente informatizado e os métodos de datação geocronológica, as questões inerentes às paleosuperfícies e à reconstituição do relevo sempre suscitaram frutíferos debates (ROSS, 1991; SALGADO, 2007; SILVA, 2009). Em paralelo, historicamente a cartografia geomorfológica secundarizou informações referentes à cronologia das formas mapeadas, embora esse seja considerado um dos aspectos elementares de análise do relevo (COLTRINARI, 2011; VERSTAPPEN, 2011; SILVEIRA e SILVEIRA, 2021).

Na transposição do analógico e qualitativo para o digital e quantitativo, os avanços operacionais não eliminaram as subjetividades conceituais (SMITH e MARK, 2003; BISHOP et al., 2012) vinculadas às formas e processos do relevo. Trouxeram, entretanto, novas possibilidades metodológicas e de integração com áreas afins. A geomorfometria, subdividida em geral (que trata da extração de parâmetros, considerando a superfície de modo contínuo), e específica (que trata da extração de objetos, considerando a discretização da superfície), segundo Evans (1972), sintetiza tais perspectivas. Os Modelos Digitais do Terreno (MDT), assim, despontam como recursos de base (MINÁR e EVANS, 2008).

Dentre as propostas que utilizaram MDTs e atributos geomorfométricos para analisar a evolução do relevo em longo termo, salienta-se que a publicação de Rodriguez et al. (2002) é uma das pioneiras a enfatizar a relação entre morfodinâmica e morfocronologia na modelagem, cujo trabalho apresentou a função Black Top Hat, aplicada em MDTs, para estimar incisões fluviais numa bacia hidrográfica em área montanhosa. Posteriormente, Riquelme et al. (2008) utilizaram a proposta para mensurar taxas de denudação de longo-termo na porção da Cordilheira dos Andes, no Chile, e Luo et al. (2015) empregaram o método para estimar volumes erodidos em Marte.

Discussões amplas e atuais sobre os modelos de evolução da paisagem são apresentadas por Tucker e Hancock (2010), que destacaram a sofisticação e popularização de uso dos modelos numéricos aplicados à interpretação da evolução de paisagens fluviais, e Chen et al. (2014), que trouxeram uma detalhada revisão das equações fundamentais que compõem os modelos de evolução da paisagem. Mais recentemente, Cavalli et al. (2017) apresentaram uma proposta que possibilitou a avaliação de variações de elevação e estimativa de alterações volumétricas ao longo do tempo, resultante da diferença entre dois MDTs. No âmbito de aplicações com enfoque no transporte de sedimentos, essa diferenciação entre MDTs permite uma representação quantitativa e espacialmente distribuída da erosão e deposição no intervalo de tempo analisado.

Destacam-se, também, trabalhos que objetivaram identificar paleosuperfícies a partir de atributos geomorfométricos, cuja modelagem permite interpretações acerca da morfocronologia. Jarsve et al. (2014) apresentaram um método de ajuste de superfície com a utilização de mínimos quadrados para o mapeamento de peneplanos e destacaram o potencial dos modelos para representarem paleosuperfícies com redução de trabalhos de campo necessários para sua validação. Outro trabalho de destaque, publicado por Haider et al. (2015), apresentou um método de mapeamento de peneplanos utilizando apenas atributos geomorfométricos, derivados do MDE SRTM, com lógica fuzzy.

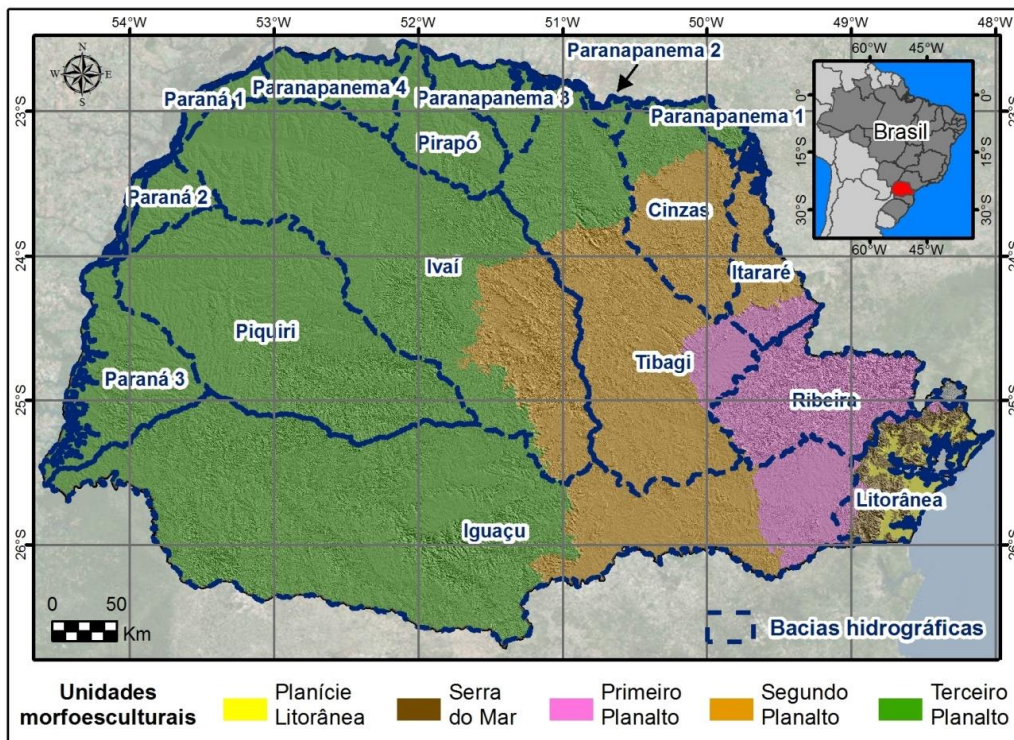
No Brasil, para a simulação dos cenários de paleorelevo pré-holocênico, numa bacia hidrográfica do estado do Rio de Janeiro, o método de Pelech (2016) considerou amostragem dos pontos de topo e das linhas de cumeada do relevo atual, considerando as elevações máximas, assumindo que tais pontos configuram remanescentes do paleorelevo, equivalentes às interpretações de superfícies aplainadas. No estado do Paraná, o estudo de Soares e Riffel (2006) resultou num

mapeamento preditivo de paleosuperfícies a partir da combinação de atributos das curvas hipsométricas e propriedades morfométricas derivadas do MDE SRTM.

Grohmann et al. (2011) discutiram sobre a aplicação do mapa de nível de base como método para de identificar áreas com possível influência tectônica mesmo dentro de domínios com litologia uniforme na região amazônica. E, de modo aplicado à discussão sobre as superfícies de erosão no Brasil, numa interpretação que considerou o contexto geológico e as teorias de evolução do relevo em longo-termo, o estudo de Grohmann e Riccomini (2012) avaliou que a integração entre dados morfométricos, termocronológicos e geofísicos não condiz com a validade do uso de superfícies aplainadas em correlações estratigráficas de âmbito regional.

Com base nesses preceitos e discussões, o presente trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de um método para a identificação e mapeamento de paleosuperfícies amparada exclusivamente por MDTs e parâmetros de atributos geomorfométricos calculados. A área de estudo contemplou todo o estado do Paraná (figura 1), cuja avaliação dos resultados considerou trabalhos prévios de datações geocronológicas, interpretações evolutivas e mensurações de taxas de denudação de longo termo.

**Figura 1** - Principais unidades morfoesculturais e bacias do estado do Paraná.



Fonte: Os autores.

## **Materiais e Métodos**

### **Processamento do Modelo Digital do Terreno e dos atributos geomorfométricos**

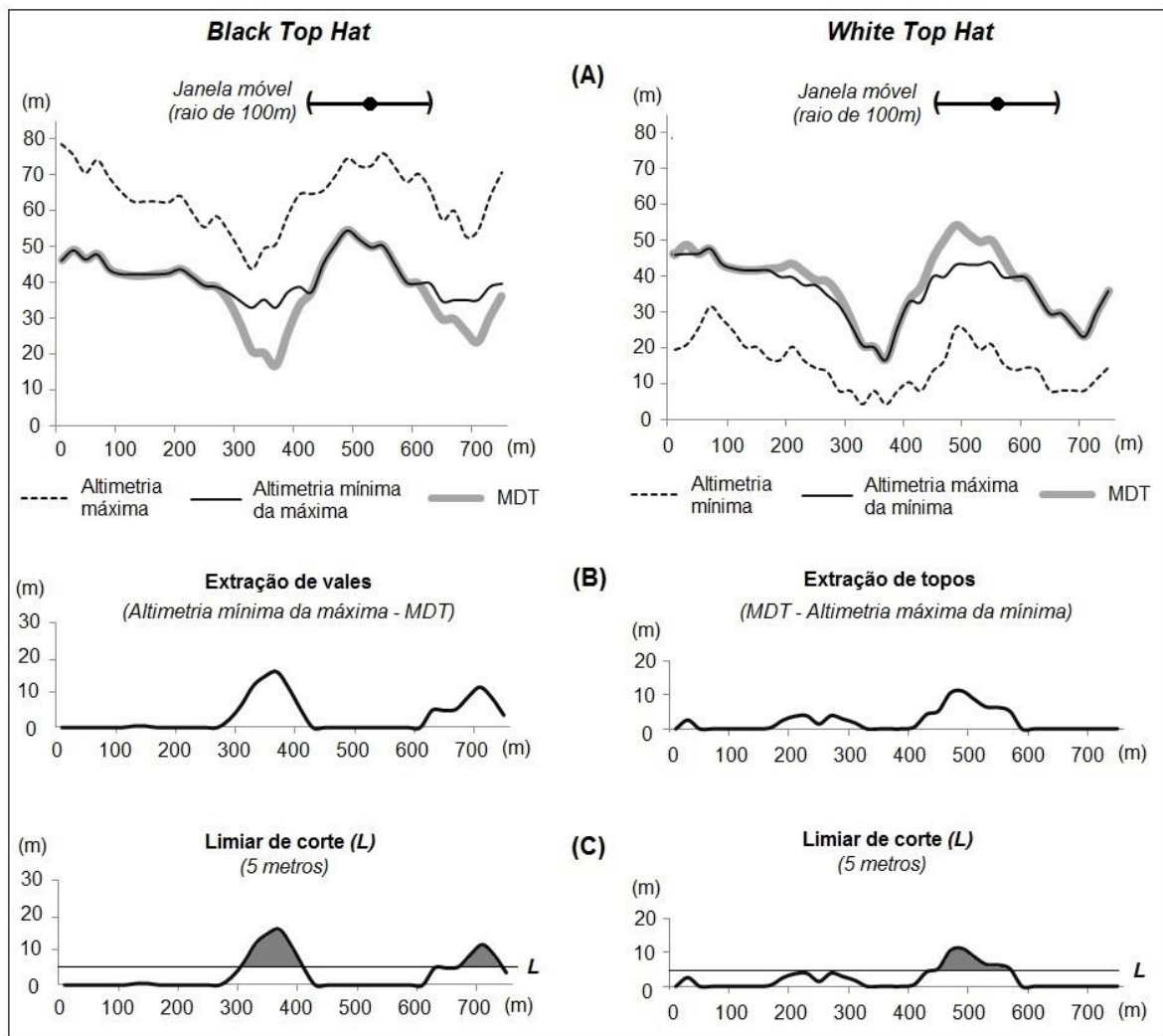
O método empregado para a obtenção do Modelo Digital do Terreno (MDT) foi o Topogrid (Hutchinson, 1989), cuja interpolação contemplou pontos cotados, curvas de nível e segmentos de hidrografia vetorizados de 96 cartas topográficas na escala 1:25.000 (porção leste) e outras 313 cartas na escala 1:50.000. A definição do tamanho da célula seguiu a proposta de complexidade do terreno de Hengl (2006), optando-se por uma célula de 20 m.

A partir do MDT foram calculados três atributos geomorfométricos, empregados posteriormente na modelagem: i) declividade, com variáveis direcionais de Horn (1981); Índice de Posição Topográfica (IPT), conforme proposta de Wilson e Gallant (2000), Weiss (2001) e Silveira e Silveira (2017); iii) Black Top Hat (figura 2), seguindo o método adaptado de Rodriguez et al. (2002).

O atributo geomorfométrico derivado do método da transformação Top Hat considerou a análise de vizinhança regional a partir do MDT. Essa função, aplicada de modo pioneiro à análise digital do relevo por Rodriguez et al. (2002), pode ser dividida em duas: i) Black Top Hat (BTH), com uma função de abertura, que mensura a altimetria mínima da altimetria máxima; ii) White Top Hat (WTH), com uma função de fechamento, que mensura a altimetria máxima da altimetria mínima, ambas a partir de uma janela móvel predefinida, conforme ilustra a figura 2A. Operacionalmente, a análise de vizinhança foi realizada pela ferramenta Focal Statistics no software ArcGIS 10.1, seguida da etapa de álgebra de mapas. Ressalta-se que, devido à variação do tamanho da janela móvel empregada no cálculo, a função Top Hat é afetada diretamente pelo fator de escala.



**Figura 2** - Função *Top Hat* aplicada à análise digital do relevo.



Fonte: Os autores.

Ao subtrair os valores do BTH ( $Z_{\text{mínmax}}$ ) pelo MDT ( $Z_0$ , célula a célula) se obtém a extração dos vales (equação 1), e ao subtrair o MDT pelo WTH ( $Z_{\text{máxmín}}$ ) se obtém a extração dos topos, de acordo com a figura 2B. Para ambos ainda é possível definir um valor limiar de corte a fim de eliminar artefatos residuais ou destacar apenas os principais vales e topos, como aponta o último passo da figura 2C.

$$BTH = Z_{\text{mínmax}} - Z_0 \quad (\text{equação 1})$$

O método *Top Hat* é similar aos mapas de *seppômen* (níveis de cimeira) e *sekkokumen* (níveis de base), conforme técnicas desenvolvidas desde a década de 1950 (HUZITA e KASAMA, 1977). Entretanto, enquanto os mapas de *seppômen* e *sekkokumen* consideram os valores máximos e mínimos, respectivamente, a partir

de janelas fixas, a proposta do *Top Hat* contempla janelas móveis onde o cálculo é feito célula a célula do MDT.

### **Parâmetros de modelagem morfocronológica**

Para a indicação da morfocronologia foi adaptada uma metodologia que objetivou reconstituir paleosuperfícies a partir da análise de vizinhança dos valores altimétricos com o atributo geomorfométrico *Black Top Hat*, cujo tamanho da janela móvel foi atribuído a partir de uma relação linear têmporo-espacial estimada. Os remanescentes preservados na paisagem dessas paleosuperfícies foram modelados pelos atributos IPT e declividade.

Algumas publicações prévias utilizaram o BTH como base para estimativa de taxas de denudação e incisão de vales (RODRÍGUEZ *et al.*, 2002; RIQUELME *et al.*, 2008; LUO *et al.*, 2015), nos quais a escolha da janela móvel foi definida em função da distância média dos objetos a serem extraídos. Entretanto, neste trabalho, buscou-se estabelecer parâmetros relacionais entre a escala espacial e temporal das feições geomorfológicas numa perspectiva ampla e padronizada. Sob a premissa de que há correlação direta entre a extensão das formas de relevo e o tempo necessário para sua formação, utilizou-se como referência a proposta taxonômica de Tricart (1965), ilustrada pela figura 3, que vincula valores de área/extensão ao tempo aproximado de permanência das feições na paisagem.

Considerou-se, portanto, que as maiores elevações residuais num entorno predefinido pela relação têmporo-espacial indicam os níveis de paleosuperfícies e que essas, por sua vez, quando tangenciadas à superfície atual em porções planas, caracterizam remanescentes ou níveis de antigos terraços.

**Figura 3** - Classificação taxonômica dos fatos geomorfológicos de Tricart.

Ordem	Unidade de superfície em km <sup>2</sup>	Características das unidades e exemplos	Unidades climáticas correspondentes	Mecanismos genéticos comandando o relevo	Ordem de grandeza de permanência temporal
I	10 <sup>7</sup>	Continentes, bacias oceânicas	Grandes conjuntos zonais, comandados por fatores astronômicos	Diferenciação da crosta terrestre, SIAL e SIMA	10 <sup>9</sup> anos
II	10 <sup>6</sup>	Grandes conjuntos estruturais	Grandes tipos de clima (interferência de influências geográficas com fatores astronômicos)	Movimento da crosta terrestre como a formação dos geosinclinais. Influências climáticas sobre a dissecação	10 <sup>8</sup> anos
III	10 <sup>4</sup>	Grandes unidades estruturais	Nuances em tipos de climas, mas sem grande importância para a dissecação	Unidades tectônicas ligadas à Paleogeografia. Velocidade da dissecação influenciada pela litologia	10 <sup>7</sup> anos
IV	10	Unidades tectônicas elementares (maciços montanhosos, <i>horsts</i> , fossas etc.)	Climas regionais de influência geográfica sobretudo nas regiões montanhosas	Influência predominante da tectônica, secundária da litologia	
<i>Soleira de Compensação Isostática</i>					
V	10	Acidentes tectônicos (anticlinas, sinclinal, <i>mont</i> etc.)	Climas locais influenciados pela disposição do relevo	Predominância da litologia e tectostática. Influências estruturais clássicas	10 <sup>7</sup> anos a 10 <sup>6</sup> anos
VI	10 <sup>-2</sup>	Formas de relevo (crista, terraço, moraina, cone de dejeção etc.)	Mesoclima diretamente ligado a forma	Predominância do fator morfodinâmico influenciado pela litologia	10 <sup>4</sup> anos
VII	10 <sup>-6</sup>	Microformas (lentes de solifluxão, solos poligonais, ravinas etc.)	Microclima diretamente ligado à forma por autocatalise	Microclima diretamente ligado à forma por autocatalise (ex.: lapíás)	10 <sup>2</sup> anos
VII	10 <sup>-8</sup>	Feições microscópicas (detalhe de corrosão, de polimento etc.)	Microambiente	Influência da dinâmica e da textura da rocha	

Fonte: adaptado de Tricart (1965)

A proposta pode ser dividida em cinco passos metodológicos: i) escolha das idades das paleosuperfícies a serem modeladas; ii) vinculação das idades com as extensões de acordo com a taxonomia de Tricart (1965); iii) definição do tamanho da janela móvel para cálculo do atributo BTH a partir da área adotada como referência; iv) modelagem das paleosuperfícies (incluindo os remanescentes e terraços); v) avaliação dos modelos obtidos, considerando datações geocronológicas e mensurações de taxas de denudação de longo termo em porções geomorfológicas representativas do estado do Paraná, cujos dados estão disponíveis na literatura (SALGADO *et al.*, 2007; RIFFEL, 2012; COUTO *et al.*, 2018; RIFFEL *et al.*, 2015; RIFFEL *et al.*, 2016).

A adoção dos recortes temporais para as paleosuperfícies teve como referência os estudos de Bigarella *et al.* (1965) e Bigarella (2007), cuja interpretação sobre as superfícies aplanadas na porção leste do estado do Paraná contempla três pediplanos (Pd<sub>3</sub>, Pd<sub>2</sub> e Pd<sub>1</sub>) e dois níveis de pedimentos embutidos (P<sub>2</sub> e P<sub>1</sub>). Conforme a proposta, os pediplanos foram elaborados durante o Eoceno (Pd<sub>3</sub>),



Mioceno Superior a Plioceno Inferior (Pd<sub>2</sub>) e Plio-Pleistoceno (Pd<sub>1</sub>), enquanto os pedimentos correspondem às glaciações quaternárias Kansan (P<sub>2</sub>) e Illinoian (P<sub>1</sub>).

Entretanto, destaca-se que pelo fato das paleosuperfícies serem reconstituídas para todo o estado do Paraná, assumiu-se como modelo conceitual uma perspectiva poligenética para a origem e evolução das superfícies aplanadas (SALGADO, 2007). Utilizou-se, portanto, a referência temporal dos pediplanos e pedimentos, mas a interpretação das paleosuperfícies para a área de estudo em sua totalidade considerou tanto a influência climática quanto estrutural e tectônica. Assim, os pediplanos foram reinterpretados como paleosuperfícies (Ps) e os pedimentos como terraços (T).

Os parâmetros utilizados para os modelos de reconstituição geomorfológica são apresentados pela tabela 1, que evidencia os critérios para adoção do tamanho de janela móvel para cálculo do BTH a partir do MDT.

Além disso, foi necessário incluir um limiar hipsométrico para a ocorrência de cada paleosuperfície, já que algumas porções do estado, com destaque para o Terceiro Planalto (figura 1), apresentam extenso processo de denudação sem que hajam feições testemunhas representadas na paisagem, seja por efeito do nível de base ou por menor homogeneidade litológica em relação às demais regiões do Paraná. Nessa perspectiva, considerou-se que a Ps<sub>3</sub> (50 Ma) não apresenta elevações residuais abaixo da altitude de 800 m, a Ps<sub>2</sub> (15 Ma) abaixo de 500 m e a Ps<sub>1</sub> (5 Ma) abaixo de 300 m. Para as paleosuperfícies mais recentes (500 e 250 mil anos) o limiar hipsométrico excluiu a planície fluviomarinha (< 20 m), constituída posteriormente.

**Tabela 1** - Parâmetros para a elaboração dos modelos de paleosuperfícies

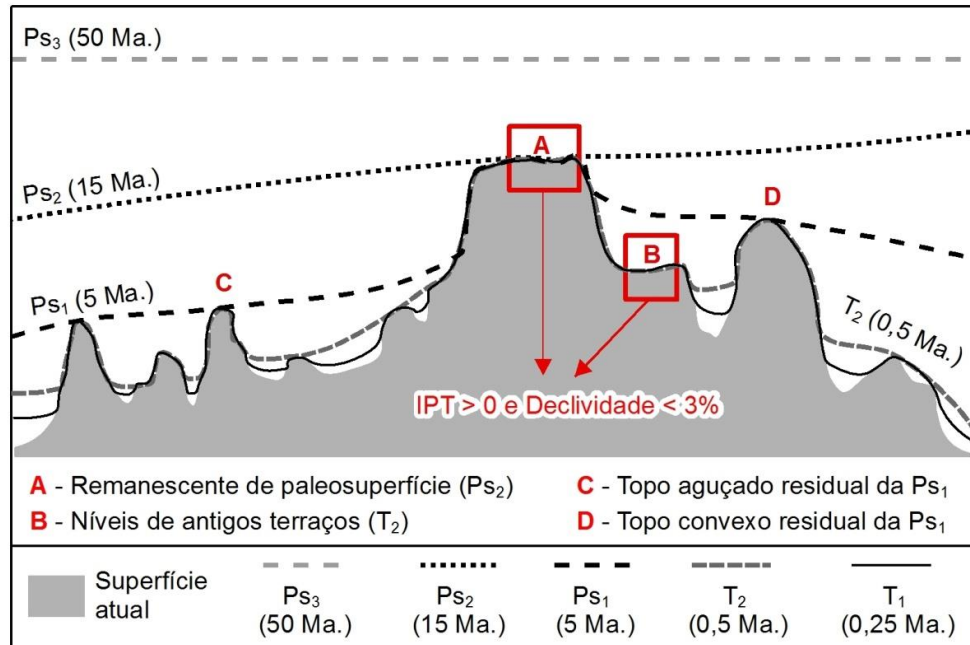
Idade da paleosuperfície poligenética	Superfície de referência (Bigarella <i>et al.</i> , 1965)	Taxonomia de Tricart		Janela móvel para cálculo do BTH	Limiar hipsométrico	Nova atribuição
		Parâmetro temporal (anos)	Parâmetro espacial (km <sup>2</sup> )			
0,25 Ma	P <sub>1</sub>	10 <sup>5,4</sup>	10 <sup>-1,7</sup>	140m x 140m	> 20m	T <sub>1</sub>
0,5 Ma	P <sub>2</sub>	10 <sup>6,7</sup>	10 <sup>-1</sup>	300m x 300m	> 20m	T <sub>2</sub>
5 Ma	Pd <sub>1</sub>	10 <sup>6,7</sup>	10	3km x 3km	> 300m	Ps <sub>1</sub>
15 Ma	Pd <sub>2</sub>	10 <sup>7,2</sup>	10 <sup>2</sup>	10km x 10km	> 500m	Ps <sub>2</sub>
50 Ma	Pd <sub>3</sub>	10 <sup>7,7</sup>	10 <sup>3,5</sup>	60km x 60km	> 800m	Ps <sub>3</sub>

Os remanescentes planos que testemunham morfologicamente a ocorrência e os níveis das paleosuperfícies foram identificados com base na combinação entre o IPT com raio de 500 m (25 células), que destacou as porções mais elevadas e com dispersão do fluxo (IPT > 0), e a declividade, que segmentou as porções planas

(declividade < 3%). Ao tangenciar o nível de uma paleosuperfície, atribuiu-se sua cronologia estimada para a feição (figura 4A e 4B).

Quando o segmento plano ou os topos são tangenciados por mais de uma paleosuperfície, definiu-se que prevalece a mais antiga (figura 4A, 4C e 4D).

**Figura 4** - Modelagem das paleosuperfícies e indicadores morfocronológicos



Fonte: Os autores.

A avaliação dos modelos obtidos foi realizada a partir da comparação com mensurações e datações amostrais publicadas para porções representativas do estado do Paraná. Em relação aos trabalhos que mensuraram taxas de denudação utilizando nuclídeos cosmogênicos <sup>10</sup>Be coletados em sedimentos aluviais, utilizou-se como referência o trabalho de Couto *et al.* (2018), na região noroeste do Terceiro Planalto, e Salgado *et al.* (2014), na região da Serra do Mar com a inclusão do reverso da escarpa no Primeiro Planalto. Para essas porções foi possível estabelecer um parâmetro quantitativo entre os modelos e as estimativas de erosão *in situ*, a partir da subtração entre os MDTs das paleosuperfícies e o MDT da superfície atual, dividindo o resultado pela idade da paleosuperfície para obtenção do valor em metros por milhões de anos (m/Ma). Também foram utilizados trabalhos de datação geocronológica que, embora não estimem taxas de denudação, indicam a idade de remanescentes de antigas superfícies.

## Resultados e Discussão

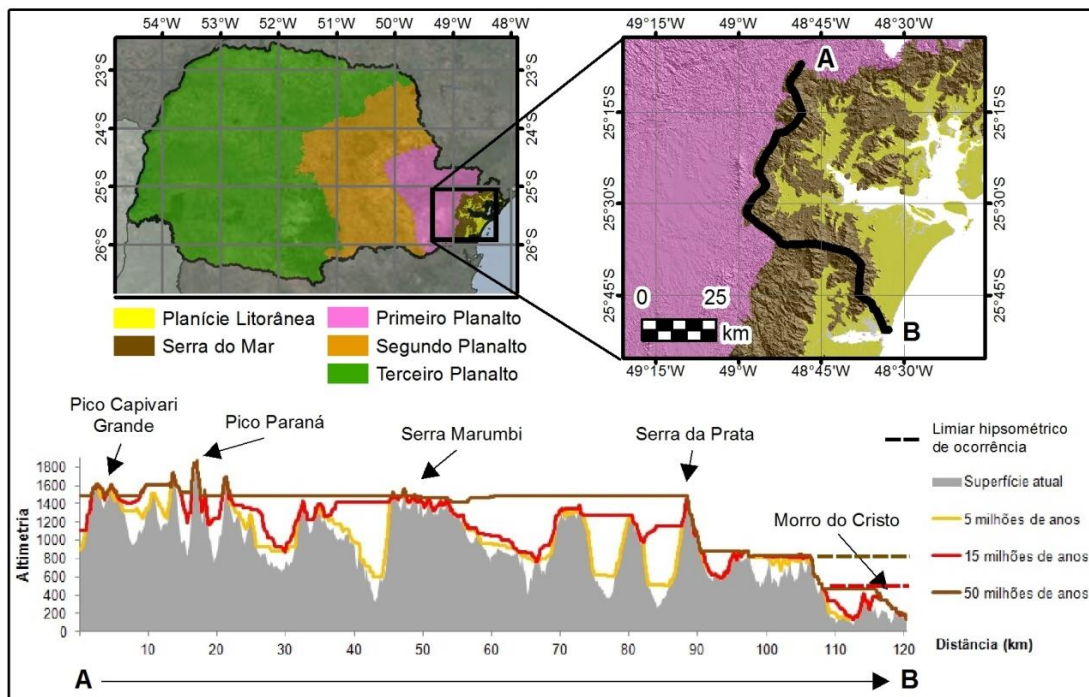
### Planície litorânea e Serra do Mar

Na Serra do Mar, a modelagem resultante foi a de maior representatividade e correlação, tanto em aspectos qualitativos quanto quantitativos. A figura 5 exibe um perfil topográfico que perpassa três serras locais muito discutidas no presente trabalho: Serra do Ibitiraquire, Serra do Marumbi e Serra da Prata. A aplicação do atributo BTH com distintos tamanhos de janelas móveis demonstrou que: i) a paleosuperfície equivalente a 50 milhões de anos ( $Ps_3$ , janela de 60x60 km) se sobrepôs à superfície atual nos principais picos de cada serra local; ii) a paleosuperfície de 15 milhões de anos ( $Ps_2$ , janela de 10x10 km) contemplou os picos intermediários, de elevações secundárias presentes nos próprios conjuntos das serras; iii) a paleosuperfície de 5 milhões de anos ( $Ps_1$ , janela de 3x3 km) tangenciou todas as demais elevações e também os topos locais, que guardam relação direta com os divisores das bacias hidrográficas atuais.

Considerando os estudos realizados por Bigarella *et al.* (1965; 1978) e Bigarella (2007) sobre a evolução policíclica do relevo condicionada pelo clima no Paraná e a formação de pediplanos, as idades estimadas para as paleosuperfícies e suas respectivas posições na paisagem condizem com a interpretação das superfícies aplanadas. O padrão mapeado com  $Ps_3$  (equivalente ao  $Pd_3$ ) nos principais picos montanhosos,  $Ps_1$  ( $Pd_1$ ) em elevações intermontanas e  $T_2$  ( $P_2$ ) nos morros convexados das porções inferiores, foi identificado em toda a Serra do Mar.

A paleosuperfície designada de  $Ps_3$  foi modelada tendo como referência a escala temporal de 50 milhões de anos, equivalente à Superfície Sul-Americana (KING, 1956; VALADÃO, 1998), Superfície Purunã (AB'SABER e BIGARELLA, 1961), Superfície Japi (ALMEIDA, 1964), além do mencionado pediplano  $Pd_3$  de Bigarella *et al.* (1965; 1978). A elaboração dessa superfície de erosão coincide com o fim da sedimentação cretácea no Brasil e corresponde, atualmente, aos níveis de cimeira. No mapeamento realizado, esses níveis de cimeira preservados representam os picos dissecados sustentados por intrusões graníticas na Serra do Mar, com cotas altimétricas superiores a 1400 m.

**Figura 5 - Perfil de paleosuperfícies na Serra do Mar**

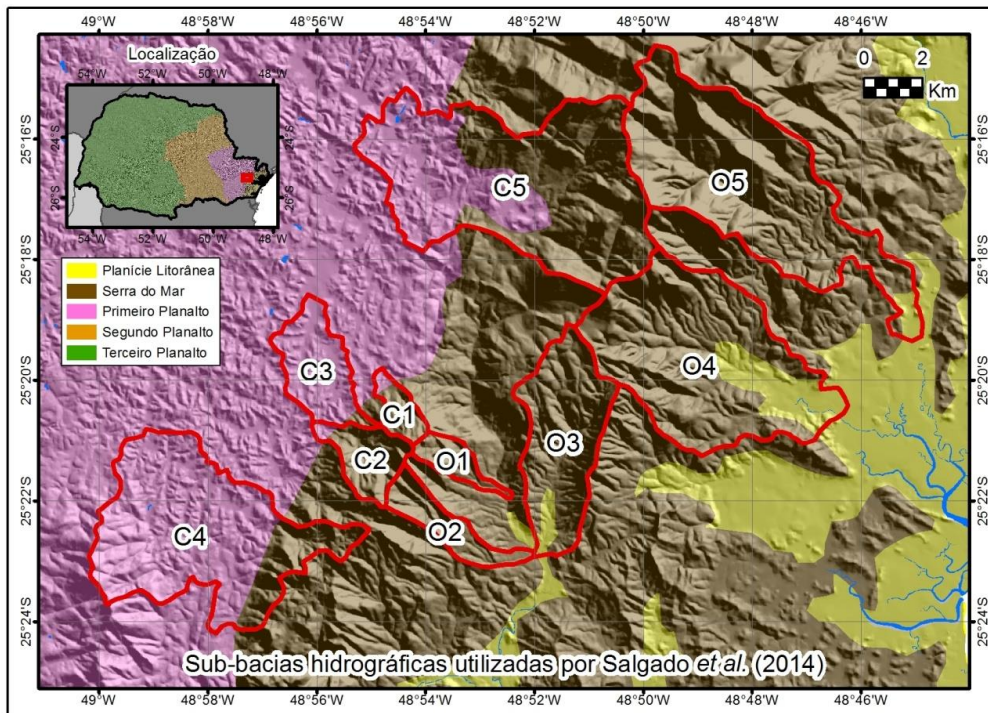


Fonte: Os autores.

Se na análise qualitativa, de representatividade na paisagem, o mapeamento morfocronológico obteve correspondência às interpretações evolutivas de longo termo, o êxito da modelagem foi destacado pela correlação quantitativa com estimativas de taxas de denudação publicadas por Salgado *et al.* (2014) em bacias hidrográficas que drenam para o Primeiro Planalto (rio Ribeira) e para a Planície Litorânea (figura 6). Essa diferenciação é importante por considerar que a Serra do Mar se encontra em recuo erosivo no *front* de sua escarpa e, portanto, as bacias a leste apresentam padrão mais dissecado em função do nível de base.



**Figura 6** - Sub-bacias hidrográficas utilizadas por Salgado *et al.* (2014) para a mensuração da taxa de denudação.



Fonte: Os autores.

Na comparação quantitativa entre a modelagem e a mensuração de Salgado *et al.* (2014), os resultados tabulados são apresentados pela tabela 2, na qual consta a denudação estimada pela concentração de  $^{10}\text{Be}$ , para cada bacia da figura 6, em relação às paleosuperfícies  $\text{Ps}_3$  (50 Ma),  $\text{Ps}_2$  (15 Ma) e  $\text{Ps}_1$  (5 Ma) modeladas no presente trabalho. Os resultados em metros por milhão de ano (m/Ma), derivados da subtração entre cada paleosuperfície e o MDT atual, dividida pela idade atribuída, demonstraram equivalência e proporcionalidade quantitativa.

Considerando a média do conjunto total de bacias, a taxa de denudação mensurada por  $^{10}\text{Be}$  foi de  $18,57 \pm 1,12$  m/Ma e todos os cenários modelados se aproximaram desse valor, indicado no intervalo entre as taxas médias e máximas calculadas: para a  $\text{Ps}_3$ , o valor médio foi 13,6 e a máxima 20,6 m/Ma; na  $\text{Ps}_2$ , o valor médio resultante foi de 7,7 e a máxima de 23,9 m/Ma; por fim, a  $\text{Ps}_1$  teve 12,8 como taxa média e 49,9 m/Ma como máxima.

Na comparação detalhada, bacia a bacia, a  $\text{Ps}_3$  foi a de maior correlação com os valores estimados por Salgado *et al.* (2014), por considerar uma escala temporal mais abrangente que as outras duas paleosuperfícies modeladas. Notou-se, nas sub-bacias hidrográficas do rio Ribeira, que todos os valores da  $\text{Ps}_3$  seguiram uma proporção de valores pouco abaixo das taxas de referência. Ainda assim, considerando os valores médios, o erro foi de apenas 1,43 m/ma (para menos). Por



ter se mostrado proporcional, essa pequena divergência pode estar associada à definição dos parâmetros para cálculo da paleosuperfície. Ou seja, pequenos ajustes no tamanho da janela móvel para cálculo do BTH ou nas idades vinculadas à taxonomia de Tricart (1965) tendem a refinar os resultados obtidos.

**Tabela 2** - Resultados das estimativas de taxas de denudação na Serra do Mar.

Recortes		Salgado <i>et al.</i> (2014) (m/Ma)	Estimativa de taxa de denudação					
			Ps <sub>3</sub> (50 Ma)		Ps <sub>2</sub> (15 Ma)		Ps <sub>1</sub> (5 Ma)	
			Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)	Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)	Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)
<b>Área total</b>	<b>Média</b>	<b>18,57 ± 1,12</b>	<b>13,56</b>	<b>20,57</b>	<b>7,68</b>	<b>23,88</b>	<b>12,78</b>	<b>49,9</b>
	C1	8,3 ± 0,3	7,8	12,5	2	5,0	4,7	14,8
Sub-bacias hidrográficas do rio Ribeira	C2	8,1 ± 0,28	7,4	12,5	4,9	14,8	14,4	44,6
	C3	13,2 ± 0,47	12	13,0	4,1	6,6	8,0	17
	C4	12,4 ± 0,39	10,2	12,7	17,2	39,4	9,8	42,4
	C5	13,5 ± 0,41	9,2	14,2	13	39,4	15,7	56
	<b>Média</b>	<b>11,1 ± 0,37</b>	<b>9,3</b>	<b>13</b>	<b>8,2</b>	<b>21,0</b>	<b>10,5</b>	<b>35,0</b>
	O1	29,9 ± 1,39	14,3	26,3	4,8	21	3,7	37,7
Sub-bacias hidrográficas da Bacia Litorânea	O2	15,5 ± 0,51	16,6	27,7	4,4	19,5	8,8	40,2
	O3	47,7 ± 5,65	20,0	27,8	10,4	27,6	19,2	62,6
	O4	17 ± 1,13	22,5	29,5	5,7	21,1	14,3	63,4
	O5	20,1 ± 0,71	15,5	29,5	10,5	44,4	29,2	120,2
	<b>Média</b>	<b>26 ± 1,87</b>	<b>17,8</b>	<b>28,2</b>	<b>7,2</b>	<b>26,7</b>	<b>15,0</b>	<b>64,8</b>

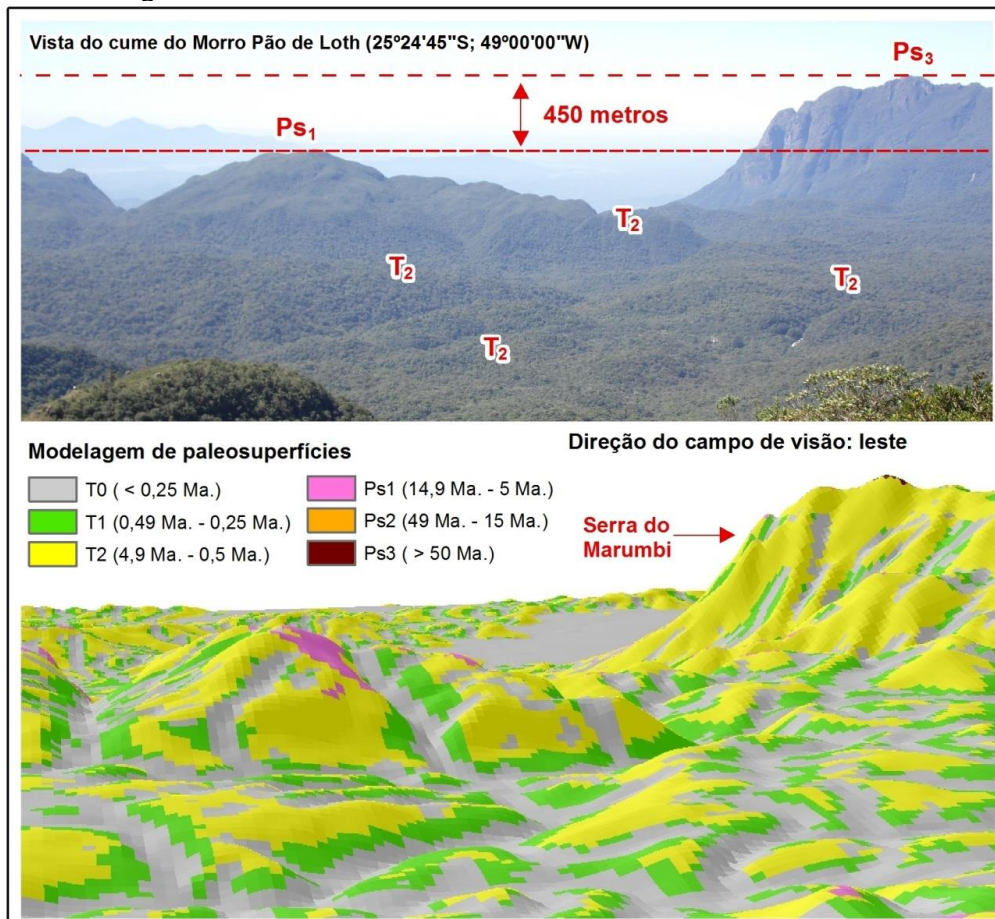
Nas sub-bacias hidrográficas da Bacia Litorânea, o erro médio da Ps<sub>3</sub> em relação à taxa de referência foi maior: 6,33 m/ma (também para menos), sendo que a bacia O3 foi a de maior divergência. Isso se deve ao mencionado contato com a Planície Litorânea, como se observa na figura 6, que diminui os valores obtidos pelo BTH e, como consequência, dos valores de denudação (subtração entre os níveis das paleosuperfícies e a superfície atual). Entretanto, os resultados também se mostraram proporcionais, pois todas as sub-bacias da porção leste tiveram taxa de denudação maior do que as da porção oeste. No conjunto, representou quase o dobro: 17,8 m/Ma, para as sub-bacias hidrográficas da Bacia Litorânea, e 9,3 m/Ma, nas sub-bacias do rio Ribeira. Os resultados da modelagem indicaram, portanto, que na porção leste a denudação é, em média, 1,9 vezes maior que a oeste, enquanto Salgado *et al.* (2014) chegaram ao valor de 2,1 a 2,6 vezes maior.

A figura 7 ilustra a atribuição das paleosuperfícies na Serra do Mar, cujo ponto de tomada da fotografia marca o limite entre a bacia hidrográfica litorânea e do planalto, no Morro Pão de Loth, com campo de observação para a Serra do Marumbi. No caso representado, a diferença de altitude entre a Ps<sub>3</sub> e a Ps<sub>1</sub> foi de 450 m, o que representou, na área, uma taxa média de denudação de 10 m/Ma entre 50 Ma e 5 Ma. Entre a Ps<sub>1</sub> e a T<sub>2</sub>, que contempla todos os topos convexos

inferiores, a amplitude média de 200 m indicou uma taxa de denudação de 40 m/Ma entre 5 Ma e 500 mil anos. Sub-bacias hidrográficas analisadas que possuem características geomorfológicas semelhantes às do recorte elucidado tiveram resultados semelhantes, como a C4 ( $12,4 \pm 0,39$ ) e O3 ( $47,7 \pm 5,65$ ) da figura 6.

Na planície litorânea, todos os topos foram mapeados como  $T_2$ , ou seja, possuem no mínimo 500 mil anos (podendo variar até 5 milhões de anos, cronologia da paleosuperfície de nível superior). A partir da premissa que esses topos testemunham níveis de paleosuperfícies, a cronologia obtida pela modelagem é corroborada pela publicação de Angulo (2004), onde o autor atribui a formação da planície litorânea aos dois últimos ciclos transgressivo/regressivos do Quaternário, relacionados aos ciclos glaciais.

**Figura 7** - Modelagem na Serra da Baitaca e Serra do Marumbi.



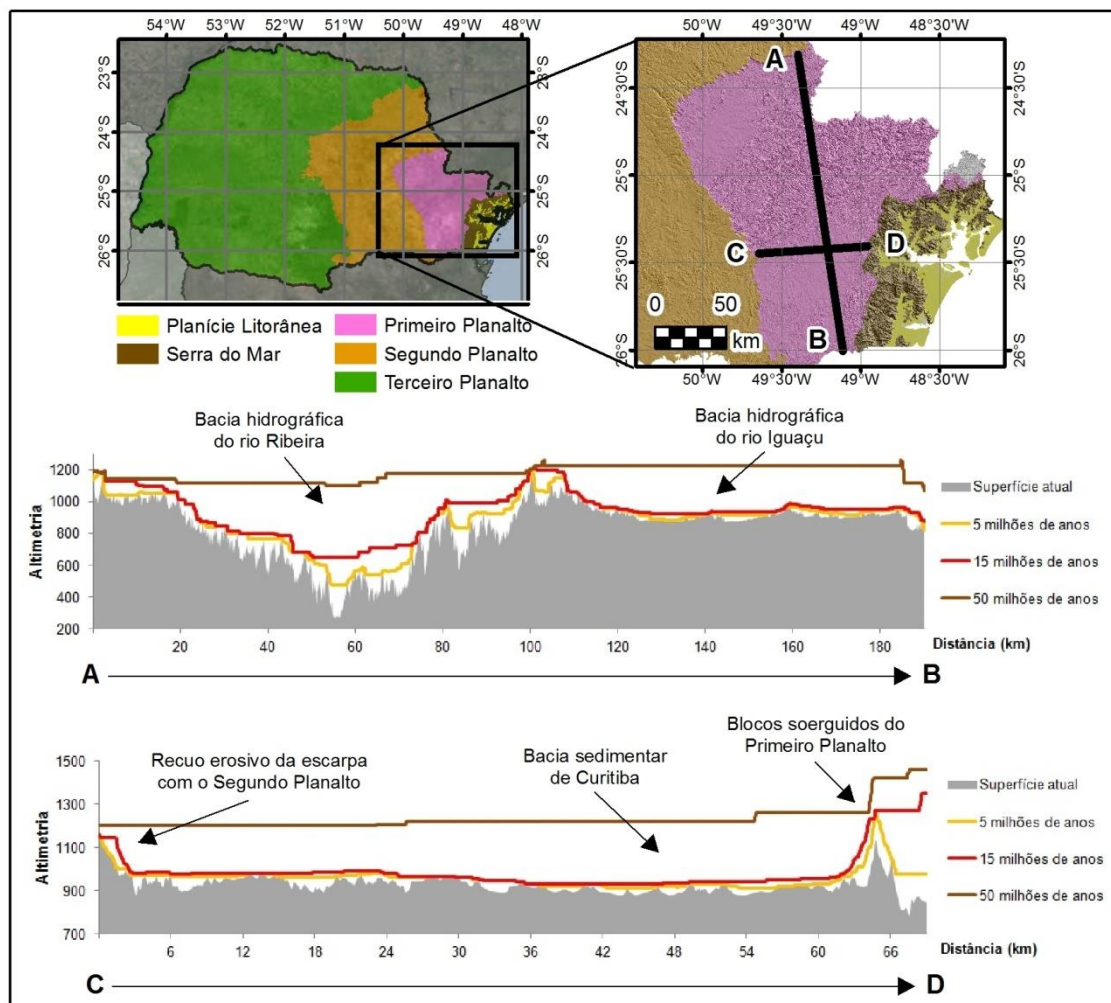
Fonte: Os autores.

### Primeiro Planalto Paranaense

Referente à modelagem da morfochronologia no Primeiro Planalto, a figura 8 apresenta dois perfis topográficos com as paleosuperfícies modeladas. O perfil A-B reforça as variações de relevo na bacia hidrográfica do rio Ribeira, a norte, e do rio

Iguaçu, a sul, com destaque para a dissecação registrada nos últimos 15 milhões de anos. A partir da subtração entre o modelo da Ps<sub>2</sub> e o MDT da superfície atual se obteve o resultado de denudação média de 15,3 m/Ma no Ribeira e 4 m/Ma no Iguaçu. Já o perfil C-D representa a bacia sedimentar de Curitiba em relação às transições morfoestruturais a leste, com os blocos soerguidos da Serra do Mar, e a oeste, com a escarpa do Purunã (Serra da Esperança) que marca o início da bacia sedimentar do Paraná. Conforme ilustrado, a paleosuperfície mais antiga, de 50 milhões de anos (Ps<sub>3</sub>), está condicionada às porções de cimeira das grandes unidades morfoestruturais mencionadas, que muitos autores relacionam à Superfície Sul-Americana (KING, 1956; VALADÃO, 1998), de idade eocênica-oligocênica, também denominada de Pd<sub>3</sub> (BIGARELLA *et al.*, 1965), Superfície Purunã (AB'SABER e BIGARELLA, 1961) e Superfície Japi (ALMEIDA, 1964).

**Figura 8** - Perfil de paleosuperfícies no Primeiro Planalto



Fonte: Os autores.

Bigarella *et al.* (1965) atribuíram as superfícies aplanadas do Primeiro Planalto do Paraná a processos morfoclimáticos com alternância de climas úmidos e

secos, formando pediplanos (Pd<sub>3</sub>, Pd<sub>2</sub> e Pd<sub>1</sub>) com níveis de pedimentos embutidos (P<sub>2</sub> e P<sub>1</sub>). Para Salamuni *et al.* (2013), as deformações das várias superfícies de aplanamento no Primeiro Planalto foram condicionadas inicialmente por processos tectônicos para, na sequência, sofrer os efeitos morfoclimáticos da erosão lateral de acordo com a predominância climática entre o fim do Paleógeno e o Holoceno. Por considerar a origem poligenética das superfícies de erosão, conforme já apresentado, no presente trabalho os pediplanos foram interpretados como paleosuperfícies e os pedimentos como níveis de terraços. Apesar da distinção na nomenclatura, manteve-se a correlação temporal para a modelagem.

Nessa perspectiva, a Ps<sub>3</sub> foi corretamente mapeada nos principais topos do Primeiro Planalto associada às características morfoestruturais regionais (Serra do Mar e Bacia Sedimentar do Paraná). Para essa paleosuperfície, não foram identificados remanescentes planos, cujos testemunhos se limitam às cotas altimétricas dos maiores picos sustentados por litologias resistentes à erosão diferencial.

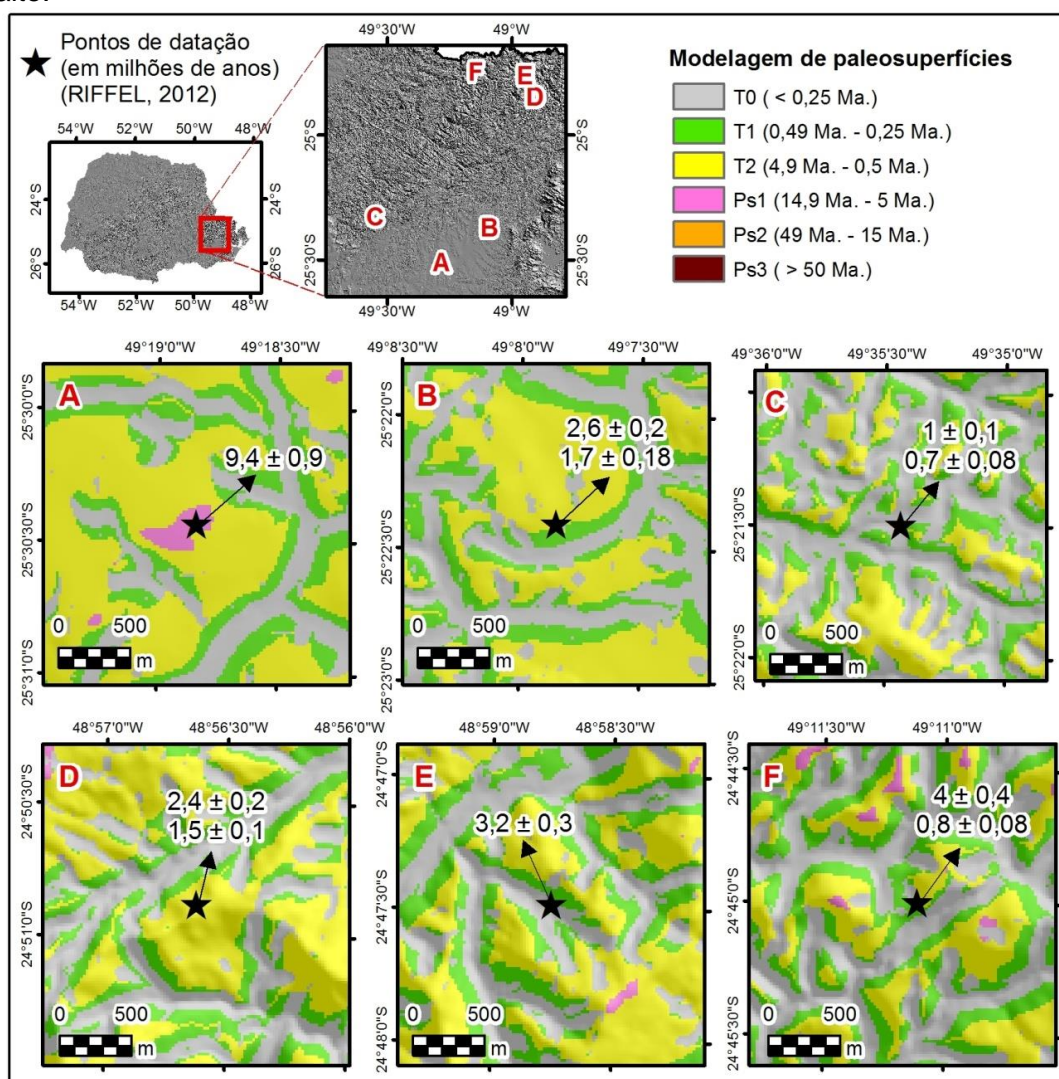
Constatou-se que a Ps<sub>2</sub> foi modelada nas adjacências das duas maiores planícies fluviais do Primeiro Planalto. Esses resultados são condizentes às interpretações de estudos prévios, pois Bigarella *et al.* (1965) e Bigarella (2007) associaram a Pd<sub>2</sub> às superfícies intermontanas e, conforme Stefanello *et al.* (2012), os depósitos da Formação Guabirotuba (depositados em um intervalo de 23 a 1,8 Ma) são correlativos desse pediplano. Na região de Curitiba, todos os remanescentes planos da Ps<sub>2</sub> foram mapeados de modo sobreposto à Formação Guabirotuba.

Referente à Ps<sub>1</sub>, compreendida como uma superfície formada em depressões interplanálticas (BIGARELLA *et al.*, 1965; BIGARELLA, 2007), os remanescentes planos se concentraram nos divisores de tributários dos rios Iapó e Iguçu. O mapeamento de remanescentes em posições inferiores à Ps<sub>2</sub>, com a manutenção no padrão de distribuição das feições, indicou o correto mapeamento (teórico, *a priori*) por considerar que a formação de uma paleosuperfície está condicionada ao retrabalhamento do material de superfícies de erosão que a antecederam, evidenciadas pela evolução do sistema de drenagem. Como exemplo, Stefanello *et al.* (2012) citam que a Formação Tinguís, na região de Curitiba, considerada uma sequência retrabalhada da Formação Guabirotuba, foi correlacionada ao pediplano Pd<sub>1</sub> e aos pedimentos P<sub>2</sub> e P<sub>1</sub>.



De todas as paleosuperfícies, a que registrou o maior número de remanescentes planos foi a T<sub>2</sub> (equivalente a P<sub>2</sub>), interpretadas como níveis de terraços da última incisão de drenagem sobre a Ps<sub>1</sub>. Também foi o nível de paleosuperfície predominante indicado nos topos do Primeiro Planalto (figura 9), sendo que a T<sub>1</sub> representou o alargamento e aprofundamento dos vales. Conforme Bigarella *et al.* (1965), as oscilações climáticas promoveram um processo policíclico de erosão, deixando no relevo testemunhos em forma de patamares, ombreiras e terraços.

**Figura 9** - Modelagem de paleosuperfícies e pontos de datação geocronológica no Primeiro Planalto.



Fonte: Os autores.

Em aspectos geocronológicos, a comparação dos resultados da modelagem de paleosuperfícies com a datação realizada por Riffel (2012) no Primeiro Planalto demonstrou correlação. Como ilustra a figura 9, o ponto A, num topo da Formação Guabirotuba, em Curitiba foi datado com  $9,4 \pm 0,9$  Ma e a paleosuperfície



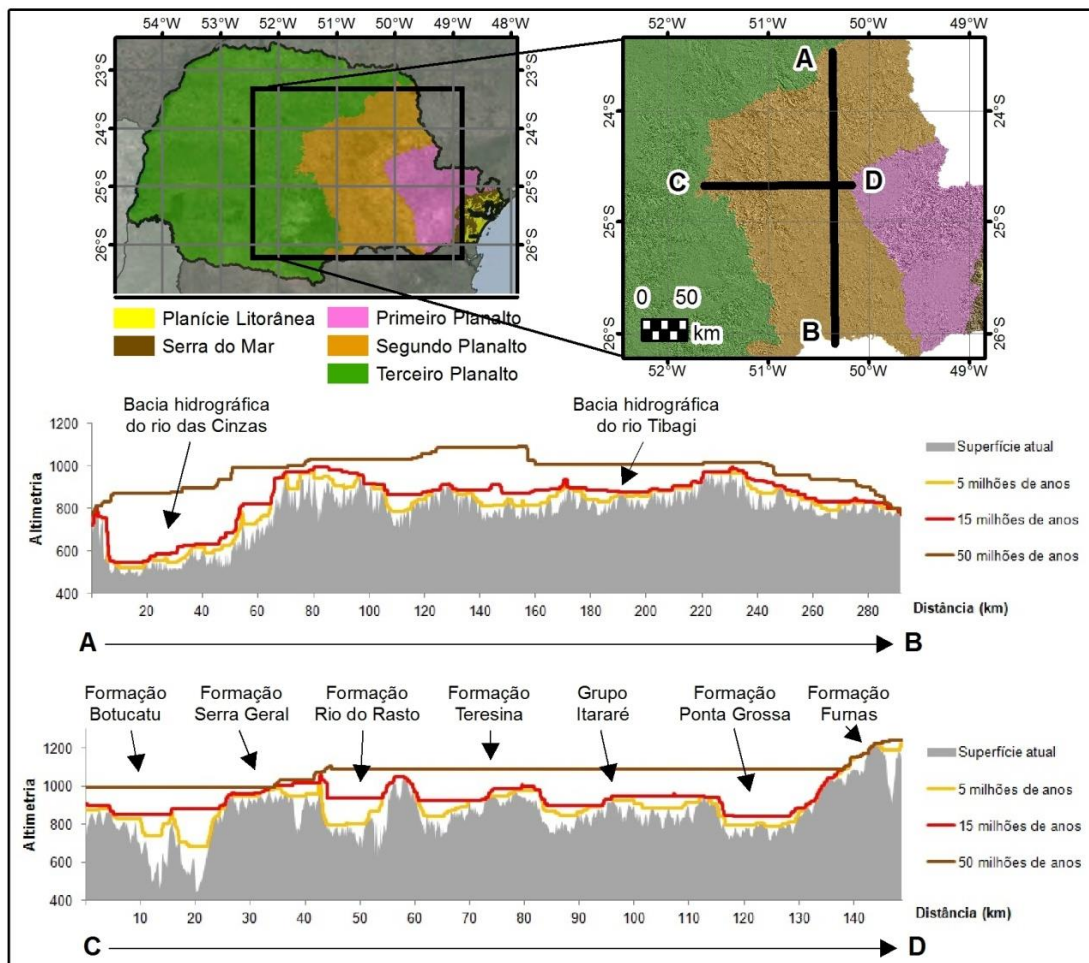
correspondente indicou 5 Ma (Ps<sub>1</sub>), podendo variar até 14,9 milhões de anos (que marca o limite cronológico da paleosuperfície de nível superior, Ps<sub>2</sub>).

### **Segundo Planalto Paranaense**

Quanto à modelagem morfocronológica do Segundo Planalto, pelo transecto A-B (figura 10) os contrastes se devem mais às bacias hidrográficas do que às variações litológicas. No transecto C-D (figura 10), entretanto, nota-se que a disposição das camadas sedimentares de leste (mais antigas) para oeste (mais recentes) exerce influência direta no padrão altimétrico devido ao processo de erosão diferencial. Em aspectos regionais, a escarpa na Formação Furnas, os divisores das grandes bacias e a escarpa basáltica sustentam as elevações equivalentes à Ps<sub>3</sub> (50 Ma). A linha da Ps<sub>2</sub> (15 Ma) marca uma fase inicial de denudação vinculada sobretudo às mudanças litológicas, enquanto a linha da Ps<sub>1</sub> (5 Ma) evidencia uma fase inicial da denudação no contexto de cada litologia.

Em decorrência da resistência erosiva do Arenito Furnas (MELO, 2013), no reverso da escarpa que marca a transição para a bacia sedimentar do Paraná, as porções superiores da escarpa preservam muitos remanescentes de paleosuperfícies. Nessa porção, a modelagem destacou testemunhos da Ps<sub>3</sub> (50 Ma), o que faz jus às interpretações dos trabalhos já mencionados que associam essa porção aos níveis de cimeira da Superfície Sul-Americana (KING, 1956; VALADÃO, 1998), Superfície Purunã (AB'SABER e BIGARELLA, 1961) ou do pediplano Pd<sub>3</sub> de Bigarella *et al.* (1965; 1978) – que, a leste, tem continuidade correlata nos topos graníticos da Serra do Mar. O arenito da Formação Furnas, de origem aluvial e litorânea, conta com a presença de caulinita. A cimentação desse mineral torna a rocha resistente à erosão, o que explica a manutenção da cornija da escarpa e, como consequência, de antigos níveis de paleosuperfícies.

**Figura 10** - Perfil de paleosuperfícies no Segundo Planalto.



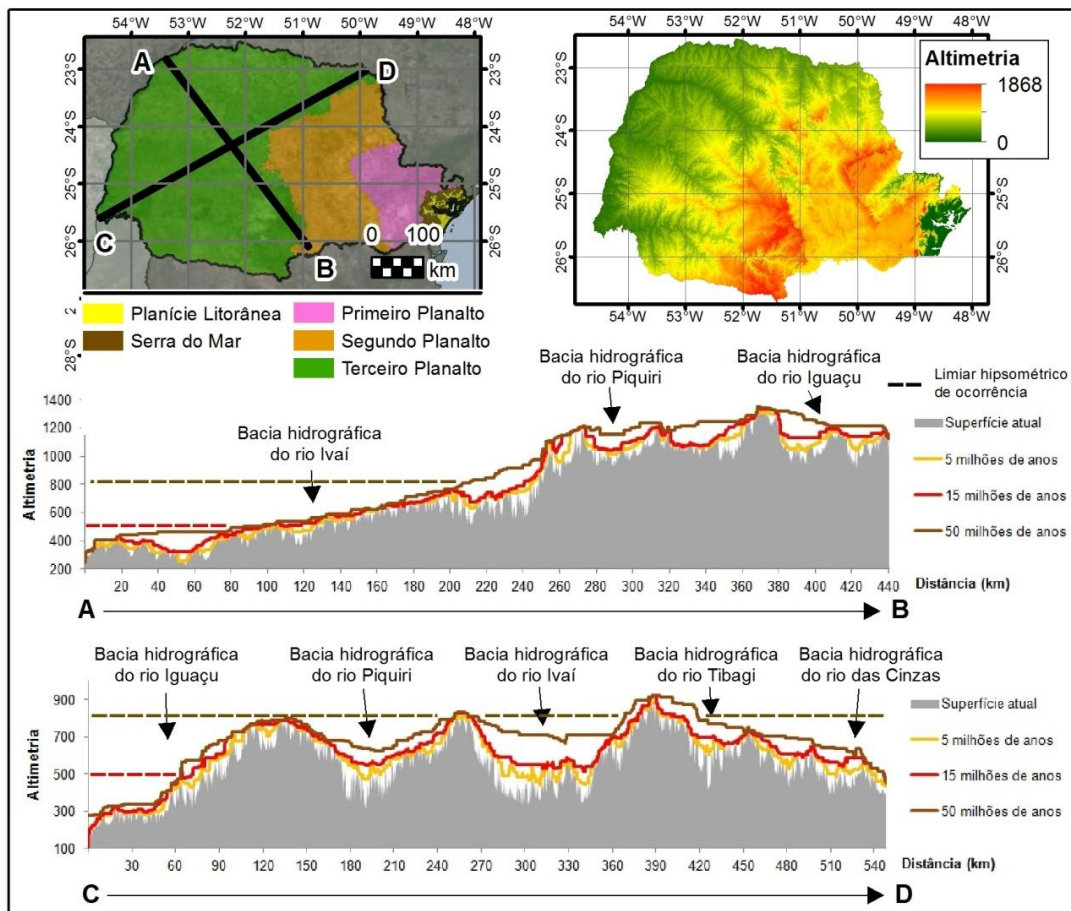
Fonte: Os autores.

A oeste, por não ter uma resistência tão grande quanto o Arenito Furnas, a modelagem estimou que a superfície sobre o Grupo Itararé foi erodida, em média, 42,8 m nos últimos 5 milhões de anos (mais de 7 m do que a denudação modelada nas camadas sedimentares subjacentes da bacia). No tocante à morfochronologia, indicada nos topos, prevaleceram as idades inferiores à Ps<sub>2</sub> (< 49 Ma), em sua maioria terraços da T<sub>2</sub> (4,9 Ma até 0,5 Ma).

### Terceiro Planalto Paranaense

Considerando, inicialmente, as interpretações teóricas sobre a evolução do relevo do Terceiro Planalto (JUSTUS, 1985; FUMIYA et al., 2019), os resultados da modelagem morfocronológica foram coerentes às hipóteses aventadas na literatura. Os níveis da Ps<sub>3</sub> (50 Ma) mapeados se concentraram na porção centro-sul do Terceiro Planalto, sobretudo nas regiões de Guarapuava e Palmas, além dos principais divisores das grandes bacias hidrográficas (figura 11).

Figura 11 - Perfil de paleosuperfícies no Terceiro Planalto.



Fonte: Os autores.

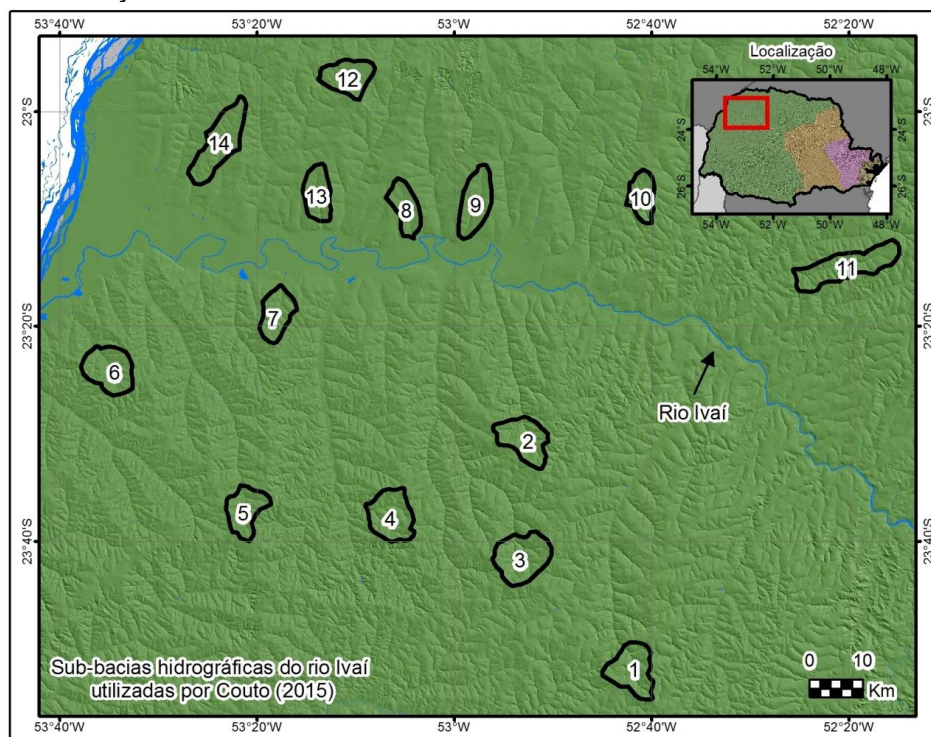
Por serem as áreas mais elevadas, passando da cota de 1200 m, constituem os níveis de cimeira. Biffi e Paisani (2018) afirmam que as superfícies de cimeira não são controladas apenas pela litologia, pois elas “transpõem limites laterais dos derrames básicos, intermediários e ácidos, embora predominem sobre estes últimos” (p. 466) e em muitos casos coincidem com falhas e fraturas, o que indica, também, controle neotectônico.

Com o aprofundamento do nível de base ocasionado pelo rio Paraná após o *rift* continental, todo o sistema de drenagem do Terceiro Planalto desde então vem dissecando fortemente o relevo de oeste para leste. Nesse contexto, os níveis da Ps<sub>2</sub> (15 Ma) foram evidenciados, com predominância, nos divisores regionais e nas principais elevações residuais no interior das grandes unidades hidrográficas, que marcam essa fase de intensa erosão remontante. Por esse motivo, quanto mais a leste, maior foi a ocorrência de topos e remanescentes da Ps<sub>2</sub>.

A comparação com as datações geocronológicas permitiu avaliar os resultados da modelagem de modo quantitativo. Couto *et al.* (2018), a partir de nuclídeos cosmogênicos <sup>10</sup>Be coletados em sedimentos aluviais de 14 sub-bacias

hidrográficas do rio Ivaí (7 em cada margem, conforme espacialização da figura 12), mensurou as taxas de denudação na região noroeste. O mencionado estudo resultou no valor médio de  $12,05 \pm 2,98$  m por milhão de ano na margem esquerda e  $7,09 \pm 1,33$  na margem direita, cuja diferença se explica, segundo o autor, pelo soerguimento da margem esquerda durante o Quaternário que ocasionou o reajuste fluvial dos níveis de base regionais (rio Paraná e rio Ivaí).

**Figura 12** - Sub-bacias hidrográficas utilizadas por Couto *et al.* (2018) para a mensuração da taxa de denudação.



Fonte: Os autores.

Ao subtrair os modelos das paleosuperfícies pelo MDT com a superfície atual, dividindo os resultados pelas idades de cada uma delas (50, 15 e 5 milhões de anos), a tabela 3 apresenta os valores obtidos pela modelagem e uma comparação com as datações de Couto (2015) para cada sub-bacia contemplada (especializadas na figura 12). Como a região noroeste não possui remanescentes da Ps<sub>3</sub>, as taxas de denudação desse modelo foram distintas das estimativas mensuradas. O fato de não haver topos residuais referentes a esse paleorrelevo justifica os baixos valores, que em todos os casos não passou de 3,84 m/Ma.

**Tabela 3** - Estimativas de taxas de denudação no Terceiro Planalto

Recortes	Couto <i>et al.</i> (2018) (m/Ma)	Estimativa de taxa de denudação						
		Ps <sub>3</sub> (50 Ma)		Ps <sub>2</sub> (15 Ma)		Ps <sub>1</sub> (5 Ma)		
		Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)	Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)	Média (m/Ma)	Máximo (m/Ma)	
Sub-bacias	1	17,94 ± 0,79	1,2	3,3	3,2	9,7	5,3	22



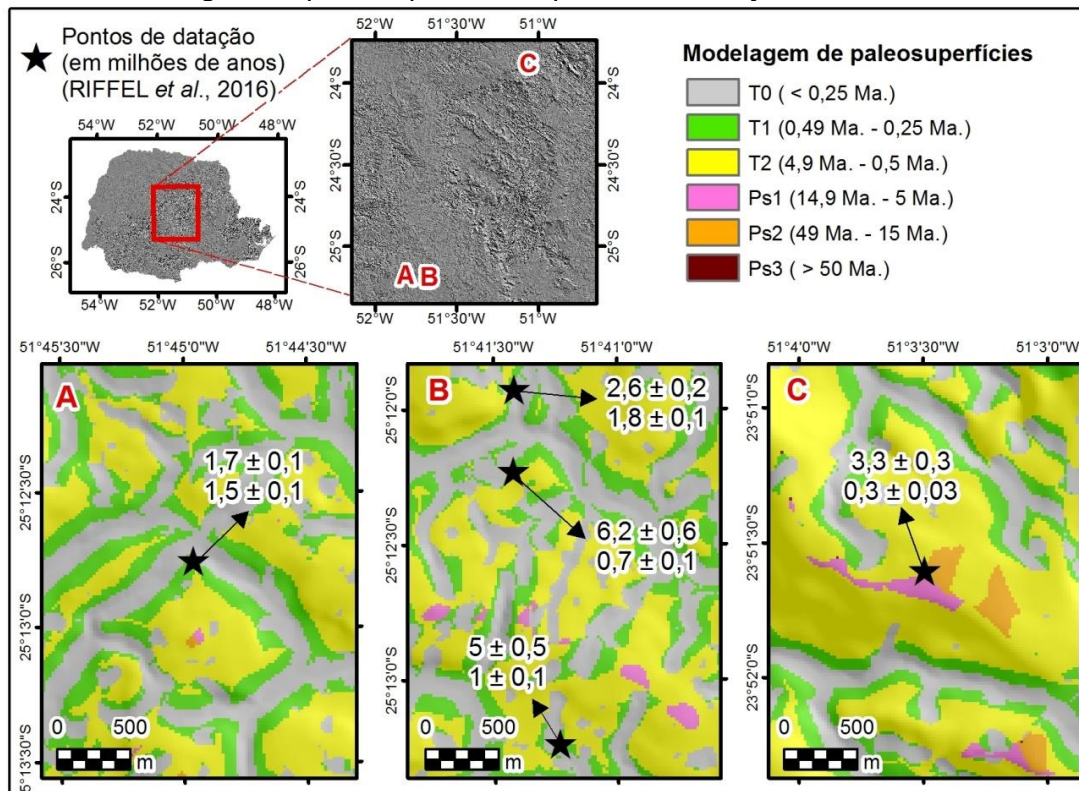
hidrográficas da margem esquerda do rio Ivaí	2	13 ± 0,44	1,5	3,8	3,5	11,2	4,6	20
	3	12,82 ± 0,56	1,2	3,2	3,8	10	4,6	20,7
	4	11,15 ± 0,35	1,4	3,2	2,8	8,1	4,5	15,5
	5	10,64 ± 0,33	1	2,8	3,1	9	4,3	17,1
	6	9,92 ± 0,32	0,8	2	2,6	7	4,1	14,9
	7	8,88 ± 0,34	2	3,7	2,5	6,9	3,9	13,8
	<b>Média</b>	<b>12,05 ± 2,98</b>	<b>1,3</b>	<b>3,1</b>	<b>3,1</b>	<b>8,8</b>	<b>4,5</b>	<b>17,7</b>
Sub-bacias hidrográficas da margem direita do rio Ivaí	8	8,41 ± 0,28	2,7	4,5	1,9	5,7	2,7	13,2
	9	8,07 ± 0,26	2,5	4,2	1,6	5,3	3,2	13,7
	10	7,99 ± 0,25	2,4	4,4	2,3	7,9	3,5	15,2
	11	7,94 ± 0,27	1,8	4,1	2,8	8,5	5	16,7
	12	6,48 ± 0,21	1	2,6	2,8	7,1	2,5	12,8
	13	6,38 ± 0,23	2,3	4	1,8	5,7	3,3	14,2
	14	4,37 ± 0,16	1,5	3,1	2	6,3	3,3	12,5
<b>Média</b>	<b>7,09 ± 1,33</b>	<b>2,03</b>	<b>3,84</b>	<b>2,17</b>	<b>6,64</b>	<b>3,36</b>	<b>14,04</b>	

Os resultados da Ps<sub>2</sub> e principalmente da Ps<sub>1</sub>, por indicarem um recorte têmporo-espacial menor, se aproximaram da datação de referência. Na margem esquerda, considerando a denudação nos últimos 5 milhões de anos, a modelagem indicou o valor médio de 4,5 m/Ma e máximo de 17,7, cujo valor de referência (12,05 m/Ma) está inserido nesse intervalo. O mesmo ocorreu na margem direita, na qual o valor médio derivado do modelo foi 3,36 m/Ma, o máximo foi 14,04 m/Ma e a datação de Couto *et al.* (2018) apontou 7,09 m/Ma. Destaca-se que a modelagem também identificou a tendência da margem esquerda do rio Ivaí ter passado por maior processo de dissecação do relevo.

A datação realizada por Riffel *et al.* (2016) pelo método (U–Th)/He, na região de Guarapuava, indicou que o relevo da área teve conformação recente, com idades que variaram de 6,2 ± 0,6 a 0,7 ± 0,1 milhões de anos. Os autores justificaram os valores em função da evolução policíclica da paisagem. Dos cinco pontos analisados, conforme a figura 13, todos se localizaram sobre o nível do T<sub>2</sub> (4,9 - 0,5 Ma). Com exceção do ponto central do recorte da figura 13B, com idade datada em 6,2 ± 0,6, que foi modelado incorretamente, os demais compreenderam (no limiar) o intervalo da classe da paleosuperfície.



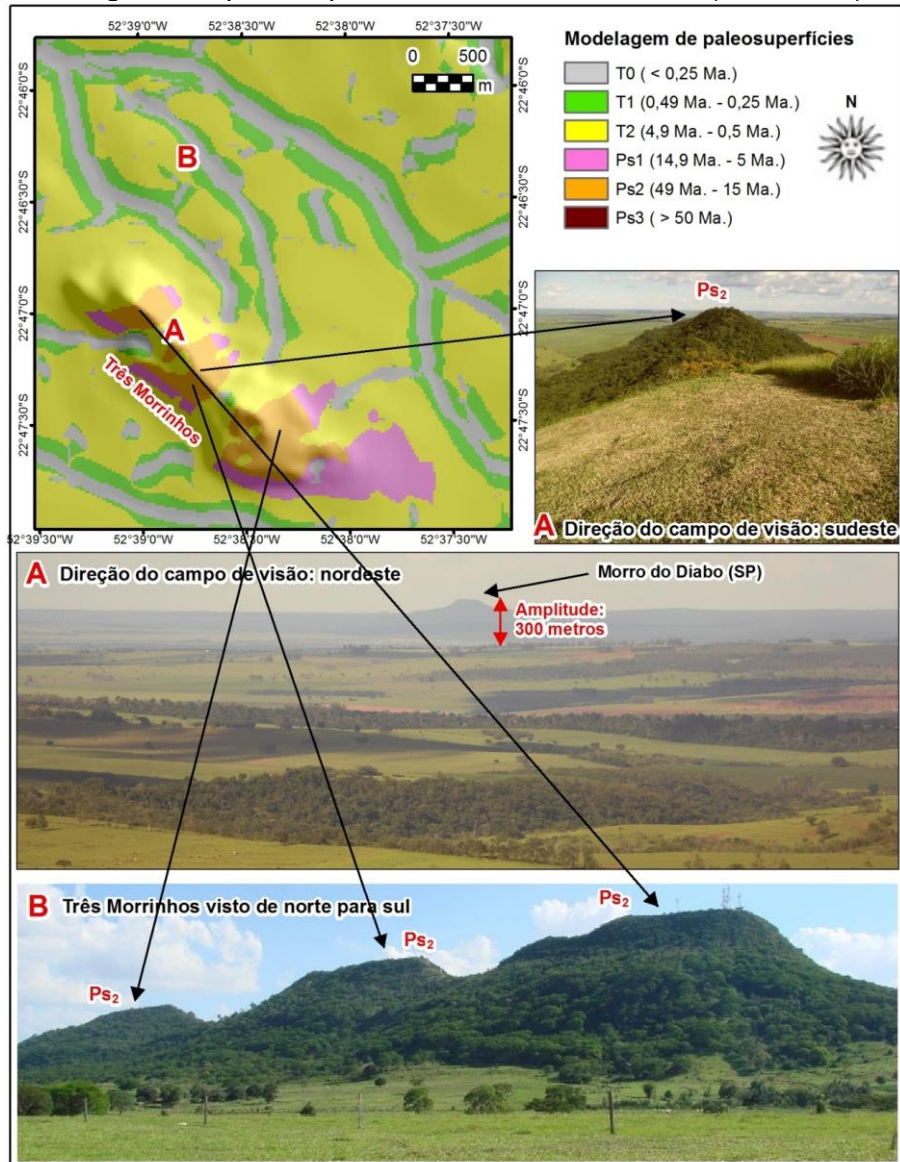
**Figura 13** - Modelagem de paleosuperfícies e pontos de datação no Terceiro Planalto.



Fonte: Os autores.

Outro aspecto relevante mapeado (figura 14) foi a atribuição da Ps<sub>2</sub> ao cume dos Três Morrinhos (arenito silicificado por fluidos hidrotermais), que conforme os critérios da modelagem compreende o intervalo cronológico de 49 Ma até 15 Ma.

**Figura 14** - Modelagem das paleosuperfícies nos Três Morrinhos (Terra Rica).



Fonte: Os autores.

Esse resultado é corroborado pelo estudo de Fernandes *et al.* (2012), que, ao explicarem a evolução geomorfológica da área, inferiram que os topos correspondem à cota mínima da superfície de aplanamento Sul-Americana, elaborada entre Cretáceo Superior e Paleógeno, correlacionando-a com o Pd<sub>2</sub> dos trabalhos de Bigarella. Se os topos tiverem, de fato, a idade de aproximados 40 Ma, é possível deduzir preliminarmente pelos resultados da modelagem que a taxa média de denudação na área é de 6,25 m por milhão de ano, já que tanto os Três Morrinhos quanto o Morro do Diabo (feição correlata no estado de São Paulo) possuem amplitude altimétrica em torno de 250 m (300 até o nível de base local).

### Considerações finais

O método apresentado evidenciou a possibilidade de mapear paleosuperfícies com uso de um MDT e critérios estabelecidos a partir de parâmetros de atributos geomorfométricos, sendo uma alternativa para a inferência, ainda que em âmbito preliminar, para contribuir com estudos da evolução do relevo. Sobretudo nas comparações com os trabalhos de estimativa das taxas de denudação, verificou-se que há uma tendência equivalente (proporcional) dos resultados quantitativos da modelagem em todas as bacias hidrográficas analisadas. Isso significa que o ajuste nos parâmetros (tamanho da janela móvel) pode deixar os resultados da modelagem ainda mais próximos daqueles datados por métodos geocronológicos, como por nuclídeos cosmogênicos  $^{10}\text{Be}$ .

A concepção de vincular o tamanho das janelas móveis com a taxonomia têmporo-espacial de Tricart (1965), para então estimar as idades, foi o diferencial da proposta apresentada. Uma das principais limitações do método é a mensuração linear das taxas de erosão, computando a média de todo o período. Desconsidera-se, portanto, as taxas variáveis às flutuações climáticas pretéritas.

Salienta-se, por fim, que quanto mais sólido for o embasamento teórico e quanto maior for o rigor e a clareza metodológica acerca da parametrização, melhores serão os resultados advindos da aplicação do método apoiado em MDT. O método proposto e apresentado configura um primeiro ensaio e ainda tem potencial de aperfeiçoamento a partir da adaptação dos parâmetros e avaliação de novos experimentos. Por isso, a aplicação da proposta em outras áreas, que tenham estudos de mensuração morfocronológica para se efetuar um comparativo, também podem auxiliar no refinamento do método.

### REFERÊNCIAS

- AB'SÁBER, A. N.; BIGARELLA, J. J. Superfícies aplainadas do primeiro planalto do Paraná. **Boletim Paranaense de Geografia**, v. 4/5, p. 116-125, 1961.
- ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. In: Instituto Geográfico e Geológico. Geologia do Estado de São Paulo. Boletim IGG, v. 41, p. 167-263, 1964.
- ALMEIDA, F. F. M.; CARNEIRO, C. D. R. Origem e evolução da Serra do Mar. **Revista Brasileira de Geociências**, n.28, v.2, p.135-150, 1998.
- ANGULO, J. A. Mapa do cenozóico do litoral do estado do Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**, n. 55, p. 25-42, 2004.

BIFFI, V. H. R.; PAISANI, J. C. Superfícies de cimeira do Planalto das Araucárias - Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 19, p. 465-481, 2018.

BIGARELLA, J. J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 2 ed. Florianópolis: Editora da UFSC, vol. 3, 2007.

BIGARELLA, J. J.; MOUSINHO, M. R.; SILVA, J. X. Pediplanos, pedimentos e seus depósitos correlativos no Brasil. **Boletim Paranaense de Geografia**, n. 16 e 17, p. 117-151, 1965.

BIGARELLA, J.J; BECKER, R.D; MATOS, D.J.; WERNER, A. **A Serra do Mar e a porção oriental do Estado do Paraná: Um problema de segurança ambiental e nacional**. Secretaria do Estado do Planejamento do Paraná: Curitiba. 1978.

BISHOP, M. P.; JAMES, A.; SHRODER, J. F.; WALSH, S. J. Geospatial technologies and geomorphological mapping: concepts, issues and research directions. **Geomorphology** 137, p. 5–26, 2012.

CAVALLI, M.; GOLDIN, B.; COMITI, F.; BRARDINONI, F.; MARCHI, L. Assessment of erosion and deposition in steep mountain basins by differencing sequential digital terrain models. **Geomorphology** 291, p. 4–16, 2017.

CHEN, A.; DARBON, J.; MOREL, J.-M. Landscape evolution models: a review of their fundamental equations. **Geomorphology** 219, p. 68–86, 2014.

COUTO, E. V.; SANTOS, L. J. C.; SORDI, M. V.; BOURLÈS, D.; BRAUCHER, R.; SALGADO, A. A. R.; LÉANNI, L.; FERREIRA, J. H. D. Changes of the base levels in the Ivai and Paraná Rivers confluence zone (Southern Brazil): Denudational reflexes in the evolution of the upstream drainage network. **Zeitschrift fur Geomorphologie**, v. 62, p. 23-40, 2018.

COLTRINARI, L. Cartografia geomorfológica detalhada: a representação gráfica do relevo entre 1950-1970. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.12, n.3, p.121-130, 2011.

ELEZ, J.; SILVA, P. G.; HUERTA, P.; PERUCHA, M. A.; CIVIS, J.; ROQUERO, E.; RODRÍGUEZ-PASCUA, M. A.; BARDAJÍ, T.; GINER-ROBLES, J. L.; MARTÍNEZ-GRAÑA. Quantitative paleotopography and paleogeography around the Gibraltar Arc (South Spain) during the Messinian Salinity Crisis. **Geomorphology** 275, p. 26–45, 2016.

EVANS, I. S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In: CHORLEY, R. J. (Ed.). **Spatial analysis in geomorphology**. London: Harper & Row, Publishers, 1972.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C. Análise digital de terreno e evolução de longo-termo de relevo do centro-leste brasileiro. **Geologia USP**, Série científica, v. 12, n. 2, p. 12-150, 2012.

GROHMANN, C.H.; RICCOMINI, C.; CHAMANI, M. A. C. Regional scale analysis of landform configuration with base-level (isobase) maps. **Hydrology and Earth System Sciences** 15, p. 1493–1504, 2011.

HAIDER, V. L.; KROPÁČEK, J.; DUNKL, I.; WAGNER, B.; EYNATTEN, H. Identification of peneplains by multi-parameter assessment of digital elevation models. **Earth Surface Processes and Landforms**, 40, p. 1477–1492, 2015.

HENGL, T. Finding the right pixel size. **Computers & Geosciences** 32, p. 1283–1298, 2006.  
HENGL, T.; REUTER, H. I. (eds.) **Geomorphometry - Concepts, Software, Applications**, Series Developments in Soil Science vol. 33, Amsterdam: Elsevier, pp. 3-30, 2009.



FUMIYA, M. H.; SANTOS, L. J. C.; RIFFEL, S. B. Morphostratigraphy of ferruginous duricrusts in the northwest of Paraná. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 20, p. 707-717, 2019.

HORN, B. K. P. Hill shading and the reflectance map. **Proceedings of the IEEE**, n. 69, v.01, p. 14-47, 1981.

HUZITA, K.; KASAMA, T. **Kôbe oyobi rinsetsu chiiki chisitu-zu, 1/50,000** (Geologic map of kobe and the adjacent area, 1/50.000). Geologic map. 3rd ed. Japão: Secretaria de Planejamento, Distrito Municipal de Kobe, 1977.

JARSVE, E. M.; KROGLI, S. O.; ETZELM-ULLER, B.; GABRIELSEN, R. H. Automatic identification of topographic surfaces related to the sub-Cambrian peneplain (SCP) in southern Norway – Surface generation algorithms and implications. **Geomorphology** 211, p. 89–99, 2014.

JUSTUS, J. O. **Subsídios para interpretação morfogenética através da utilização de imagens de radar**. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geociências, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 1985.

LUO, W.; PINGEL, T.; HEO, J.; HOWARD, A.; JUNG, J. A progressive black top hat transformation algorithm for estimating valley volumes on Mars. **Computers & Geosciences**, n. 75, p. 17–23, 2015.

MELO, M.S. Perfurações de cupins e geomorfogênese em arenitos paleozoicos da região dos Campos Gerais do Paraná. **Quaternary and Environmental Geosciences**, v. 4, p. 25-33, 2013.

PAISANI, J. C.; PONTELLI, M. E.; ANDRES, J. Superfícies aplainadas em zona morfoclimática subtropical úmida no planalto basáltico da bacia do Paraná (SW Paraná / NW Santa Catarina): primeira aproximação. **Geociências** (São Paulo. Online), v. 27, p. 541-553, 2008.

PELECH, A. S. Paleorrelevo pleistocênico e estimativas de dissecação vertical e volumétrica para o Holoceno em uma pequena bacia hidrográfica – médio vale do Rio Paraíba do Sul (RJ). **Quaternary and Environmental Geosciences**, 07(1-2), p. 6-13, 2016.

RIFFEL, S. B.  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and (U-Th)/He Dating of Weathered Landsurfaces on the Rifted Continental Margin of Southern Brazil. **Tese de Doutorado**. The University of Queensland, Brisbane, 2012.

RIFFEL, S. B.; VASCONCELOS, P. M.; CARMO, I. O.; FARLEY, K. A. Combined  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$  and (U-Th)/He geochronological constraints on long-term landscape evolution of the Second Paraná Plateau and its ruiniform surface features, Paraná, Brazil. **Geomorphology** 233, p. 52–63, 2015.

RIFFEL, S. B.; VASCONCELOS, P. M.; CARMO, I. O.; FARLEY, K. A. Goethite (U-Th)/He geochronology and precipitation mechanisms during weathering of basalts. **Chemical Geology**, n. 446, p.18–32, 2016.

RIQUELME, R.; DARROZES, J.; MAIRE, E.; HÉRAIL, G.; SOULA, J. C. Long-term denudation rates from the Central Andes (Chile) estimated from a Digital Elevation Model using the Black Top Hat function and Inverse Distance Weighting: implications for the Neogene climate of the Atacama Desert. **Revista Geológica de Chile**, n. 35 (1), p. 105-121, 2008.

RODRIGUEZ, F.; MAIRE, E.; COURJAULT-RAD'E, P.; DARROZES, J. The Black Top Hat function applied to a DEM: a tool to estimate recent incision in a mountainous watershed. (Estibère Watershed, Central Pyrenees). **Geophysical Research Letters**, 29(6), 9-1 - 9-4, 2002.

ROSS, J. L.S. O relevo brasileiro, as superfícies de aplainamento e os níveis morfológicos. **Revista Departamento de Geografia (USP)**, 6, FFLCH-USP, p. 17-31, 1991.

SALAMUNI, E.; NASCIMENTO, E. R.; SILVA, P. A. H.; OKA-FIORI, C. Geomorfologia do município de Curitiba-PR. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 4, p. 327-341, 2013.

SALGADO, A. A. R. Superfícies de aplainamento: antigos paradigmas revistos pela ótica dos novos conhecimentos geomorfológicos. **Geografias**, v. 3, n. 1, p. 74-78, 2007.

SALGADO, A. A. R.; MARENT B. R.; CHEREM L. F.; BOURLÉS, D.; SANTOS, L. J. C.; BRAUCHER, R.; BARRETOS, H. N. Denudation and retreat of the Serra do Mar escarpment in southern Brazil derived from in situ-produced <sup>10</sup>Be concentration in river sediment. **Earth Surface Processes and Landforms**, n. 39, p. 311–319, 2014.

SILVA, T. M. Superfícies Geomorfológicas do Planalto Sudeste Brasileiro: Revisão teórico-conceitual. **Geo Uerj**. Ano 11, v.3, n. 20, p. 1-22, 2009.

SILVEIRA, C. T.; SILVEIRA, R. M. P. Índice de Posição Topográfica (IPT) para classificação geomorfométrica das formas de relevo no estado do Paraná - Brasil. **Revista Ra'e Ga**, volume Especial Temático de Geomorfologia, 2017.

SILVEIRA, R. M. P.; SILVEIRA, C. T. Análise temática e conceitual de mapas geomorfológicos: a transcrição gráfica da complexidade do relevo. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 73, p. 574-597, 2021.

SMITH, B.; MARK, D. M. Do mountains exist? Towards an ontology of landforms. **Environment and Planning B: Planning and Design** 30 (3), 411–427, 2003.

SOARES, P. C.; RIFFEL, S. B. Hypsometric Curves as a Tool for Paleosurface Mapping. **Mathematical Geology**, v. 38, n. 6, p. 679-695, 2006.

STEFANELLO, A. C.; PASSOS, E.; PALHARES, J. M. Estudo preliminar da ocorrência de superfícies aplanadas na porção oriental do estado do Paraná. **Ciência Geográfica** - Bauru, Vol. XVI, p. 21-32, 2012.

TRICART, J. **Principes et méthodes de la géomorphologie**. Paris: Masson Ed., 201p., 1965.

TUCKER, G. E.; HANCOCK, G. R. Modelling landscape evolution. **Earth Surface Processes and Landforms** 35, p. 28–50, 2010.

VERSTAPPEN, H. T. Old and New Trends in Geomorphological and Landform Mapping. In: SMITH, M. J.; PARON, P.; GRIFFITHS, J. (eds.) **Geomorphological Mapping: Methods and Applications**, Developments in Earth Surface Processes vol 15, Elsevier, 2011. Cap. 2. p. 13-35.

WEISS, A. **Topographic Position and Landforms Analysis**. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, 2001.

WILSON, J. P.; GALLANT, J. C. (eds.). **Terrain analysis: principles and applications**. New York: John Wiley & Sons, p.1-27, 2000.

## NOTAS DE AUTOR

### CONTRIBUIÇÃO DE AUTORIA

**Ricardo Michael Pinheiro Silveira** – Concepção, Coleta de dados, Análise de dados, Elaboração do manuscrito, Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

**Claudinei Tabora da Silveira** – Análise dos dados, Elaboração do manuscrito, Participação ativa da discussão dos resultados; Revisão e aprovação da versão final do trabalho.

### FINANCIAMENTO

Não se aplica.

### CONSENTIMENTO DE USO DE IMAGEM

Não se aplica.

### APROVAÇÃO DE COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA

Não se aplica.

### CONFLITO DE INTERESSES

Não se aplica.

### LICENÇA DE USO

Este artigo está licenciado sob a [Licença Creative Commons CC-BY](#). Com essa licença você pode compartilhar, adaptar, criar para qualquer fim, desde que atribua a autoria da obra.

### HISTÓRICO

Recebido em: 12-01-2023

Aprovado em: 14-04-2023