

## Classificação supervisionada dos elementos arquiteturais da Praia das Cabras, Rio Grande do Sul, Brasil

Elaine Baroni de OLIVEIRA & Maria Luiza Correa da Camara ROSA

Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.  
Av. Bento Gonçalves, 9.500, CEP 91.540-000, Porto Alegre, RS, Brasil (elaine.oliveira@ufrgs.br,  
luiza.camara@ufrgs.br)

---

**Resumo.** Este trabalho apresenta uma classificação automática pelo método de máxima verossimilhança dos elementos arquiteturais presentes na Praia das Cabras, Rio Grande do Sul, baseando-se na resposta espectral dos alvos, utilizando a imagem óptica do Quickbird. O resultado da classificação apresentou acurácia de 61% e índice Kappa igual a 0,56. Os valores refletem a confusão entre algumas classes, principalmente entre planície de deflação e interdunas; e entre cadeia barcanóide e dunas barcanas isoladas. Esses erros estão associados principalmente à dificuldade do usuário em diferenciar os limites entre as classes. Apesar da confusão, a classificação automática mostrou uma correspondência geral das classes delimitadas, indicando que o método selecionado foi eficaz no mapeamento dos sistemas deposicionais e dos elementos arquiteturais presentes na região de estudo.

**Palavras-chave.** Elementos arquiteturais; classificação automática; MaxVer; Sistemas deposicionais; geoprocessamento.

**Abstract.** SUPERVISED CLASSIFICATION OF THE ARCHITECTURAL ELEMENTS OF PRAIA DAS CABRAS, RIO GRANDE DO SUL, BRAZIL. This paper analyzes the performance of an automatic classification of depositional system elements using the maximum likelihood approach, based on the spectral response of the objects. The technique was performed at Praia das Cabras coastal plain, Rio Grande do Sul, Brazil, using a Quickbird image. The classification resulted 61% accuracy and Kappa index of 0.56. These values are the result of misperception between classes, mainly between deflation hollow (blowout) and interdunes; and between barcanoid ridges and barcan dunes. These errors can be associated with the user's difficulty in differentiating the boundaries between classes. Despite the confusion, the automatic classification showed an overall correspondence with the delimited units, suggesting that the selected method was effective in mapping the architectural elements of the depositional system present in the study region.

**Keywords.** architectural elements; automatic classification; MaxVer; depositional systems; geoprocessing.

---

## 1 Introdução

A Planície Costeira do Rio Grande do Sul (PCRS) corresponde a uma feição fisiográfica com área de 33.000 km<sup>2</sup> onde estão expostos os sedimentos de idades pleistocênica e holocênica depositados sob a influência de oscilações glacioeustáticas. Segundo Tomazelli & Villwock (2000), a PCRS é composta por dois tipos de sistemas deposicionais siliciclásticos: (1) Sistema de Leques Aluviais e (2) Sistema Laguna-Barreira. O sistema de leques aluviais engloba o conjunto de fácies resultantes dos processos de transporte associados aos ambientes de encosta das terras altas adjacentes à planície costeira. Por sua vez, os (quatro) sistemas deposicionais do tipo laguna-barreira são resultados das variações do nível do mar. Cada um destes sistemas registra, aproximadamente, o pico de uma transgressão, seguida pela queda do nível relativo do mar.

Um sistema deposicional, segundo Fisher & McGowen (1967), pode ser entendido como uma assembleia tridimensional de litofácies interligadas geneticamente por processos e ambientes ativos (sistemas deposicionais modernos) ou inferidos (sistemas deposicionais antigos). O mapeamento desses sistemas deposicionais pode ser realizado remotamente através do uso das geotecnologias. As geotecnologias referem-se à utilização de instrumentos e técnicas para aquisição, processamento, interpretação e representação de dados espacialmente referenciados.

Elementos arquiteturais são feições tridimensionais constituintes de um sistema deposicional, caracterizadas por uma assembleia de litofácies (Miall, 1988). Segundo Miall (1985), a descrição e definição dos elementos arquiteturais deve considerar a natureza das superfícies de contorno, a escala e as geometrias externa e interna do elemento.

O sensoriamento remoto extrai informações contidas em imagens (aéreas ou orbitais) e as codifica em documentos (tabelas, gráficos ou mapas), baseando-se na resposta espectral dos alvos a partir das propriedades específicas de cada classe de alvo, como cor, textura, entre outros. Entretanto, devido à complexidade, à extensão da área estudada e ao amplo número

de dados, a classificação manual pode mostrar-se uma tarefa complexa. Nesses casos, a automatização do processo de extração das informações através da classificação digital das imagens fornece uma boa opção para eliminar a subjetividade da interpretação humana e reduzir o tempo de esforço aplicado (Meneses & Sano, 2012).

Segundo Meneses & Sano (2012), a classificação de imagens multiespectrais é o processo de associar os pixels da imagem a um número finito de classes individuais que representam os objetos do mundo real com base dos seus valores digitais. Se um pixel satisfaz um determinado conjunto de critérios, ele é atribuído à classe que melhor satisfaz os critérios estabelecidos.

Neste contexto, este trabalho objetiva mapear os sistemas deposicionais costeiros e seus respectivos elementos arquiteturais na região denominada Praia das Cabras, no Rio Grande do Sul, a partir da classificação automática, baseando-se na resposta espectral dos alvos. A área de estudo foi escolhida por ser um sítio deposicional não-urbanizado e exibir uma grande tipologia de elementos arquiteturais costeiros.

## 2 Área, materiais e métodos

### 2.1 Localização da área

A área de estudo compreende a região denominada Praia das Cabras (30°06'S/50°11'W), no limite entre os municípios de Cidreira e Tramandaí, localizada no litoral norte do Rio Grande do Sul (Figura 1).

A costa do Rio Grande do Sul é dominada por ondas com altura significativa de 1,5 m e regime de micromaré, sendo as marés semidiurnas com amplitude de 0,5 m (Motta, 1969; Calliari *et al.*, 1998). O clima é temperado subtropical, classificado como mesotérmico úmido pela classificação de Köppen e as chuvas são relativamente bem distribuídas ao longo do ano, com precipitação média de 1.300 mm anuais (RS, 2020). O vento predominante é o de nordeste, mas a direção apresenta variação sazonal: ventos dos quadrantes norte e leste são mais frequentes

e fortes de setembro a abril, enquanto ventos dos quadrantes sul e oeste de maio a outubro (Figueiredo & Calliari, 2006).

A área escolhida está compreendida no sistema Laguna-Barreira IV, de idade holocênica, sendo que a Barreira IV apresenta, neste trecho, um padrão de empilhamento estratigráfico retrogradacional, devido a um balanço negativo de sedimentos (Dillenburg *et al.*, 2009; Barboza & Rosa, 2014; Rosa *et al.*, 2016, 2017). A região apresenta um grande campo de dunas transgressivo, composto principalmente por cadeias barcanóides e, secundariamente, por bacanas isoladas e cadeias transversais. O local, segundo Tomazelli *et al.* (1998) é um ponto de alta prioridade para preservação, já que apresenta corredores de alimentação ativos.

## 2.2 Materiais e Métodos

A primeira etapa envolveu o levantamento de dados pré-existentes e a criação de um banco de dados em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os dados utilizados no trabalho incluíram imagens ópticas do satélite Quickbird; o modelo digital de elevação de superfície (MDS) obtido pela *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), disponibilizado gratuitamente pelo Serviço Geológico dos Estados Unidos (<https://dds.cr.usgs.gov/srtm/>); e o mapa geológico do Rio Grande do Sul (Wildner *et al.*, 2008). As informações extraídas de cada um dos dados utilizados podem ser visualizadas no Quadro 1.

O projeto foi criado no módulo ArcMap™ do programa ArcGis®10.5. Foi utilizada a projeção UTM, no fuso 22 Sul, e o datum WGS-84. A primeira etapa de análise das imagens foi realizada a partir da identificação dos elementos de interpretação visual (forma, textura, dimensão, tonalidade, cor, continuidade das feições, rugosidade e orientação). As imagens ópticas foram cruzadas, com a ferramenta *Composite Bands*, ao MDS com o objetivo de realçar as diferentes feições positivas e negativas de relevo, facilitando a delimitação das feições geológicas observadas (Rosa, 2012; Rosa *et al.*, 2014). A partir do cruzamento, foi realizada a vetorização manual das feições na escala 1:5.000. O mapeamento visual dos elementos arquiteturais foi, então,

utilizado para o estabelecimento das assinaturas espectrais das classes. Posteriormente, esse mapa também foi utilizado como base para comparação com a classificação automática gerada a partir de amostras das classes determinadas pela interpretação visual. O MDS foi utilizado na interpretação visual, mas não na classificação automática devido à diferença de resolução espacial entre o modelo e a imagem óptica.

A classificação automática supervisionada dos sistemas deposicionais foi realizada a partir do método Máxima Verossimilhança (*Maximum Likelihood Classification*), utilizando a assinatura espectral (composta por 30 amostras para cada classe) e as imagens do satélite Quickbird, conforme Santos & Costa e Oliveira (2016). As informações mapeadas foram comparadas ao mapa geológico do Rio Grande do Sul, tal qual Verbovšek & Popit (2018).

A classificação por máxima verossimilhança (MAXVER) é um método de classificação supervisionada, ou seja, o usuário dispõe de informações (conhecimento prévio) que permitem a identificação das classes de interesse e a criação da assinatura espectral das classes. A MAXVER considera a ponderação das distâncias entre as médias dos valores dos pixels das classes, utilizando parâmetros estatísticos para calcular a probabilidade de um dado pixel pertencer a uma classe específica (Câmara *et al.*, 1996). Santos & Costa e Oliveira (2016), Queiroz *et al.* (2017), De Giglio *et al.* (2019), Norovsuren *et al.* (2019) e Santos *et al.* (2019) utilizaram este método em trabalhos similares e confirmaram o sucesso no seu emprego.

A acurácia da classificação foi calculada a partir da matriz de erros. A matriz de erros é uma matriz quadrada com números dispostos em linhas e colunas, onde as colunas representam os dados de referência enquanto as linhas indicam a classificação gerada. Os números indicam quantas amostras foram atribuídas a uma categoria específica em relação à categoria real (Congalton, 1991). A matriz fornece a base para descrever a precisão da classificação e caracterizar os erros (Figueiredo & Vieira, 2007). Foram calculados a acurácia geral, a precisão do usuário e do produtor e o índice Kappa.

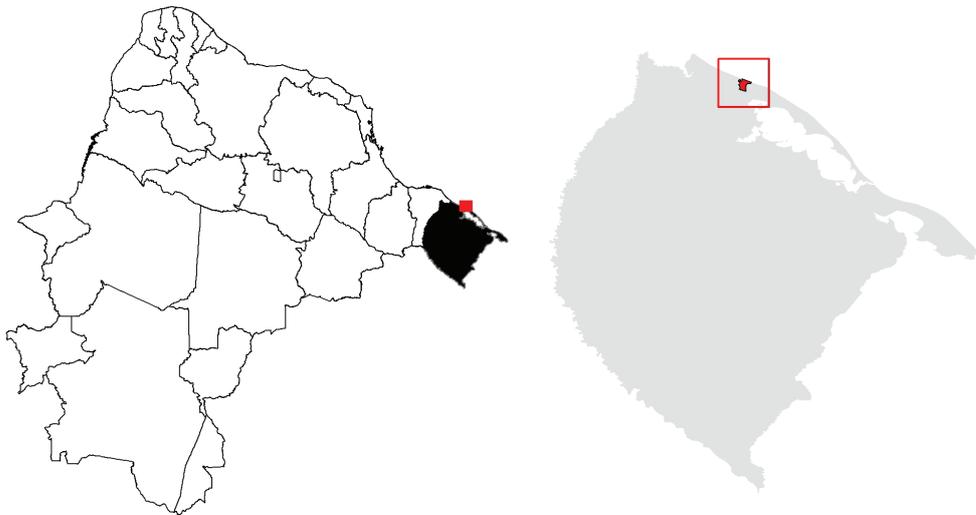
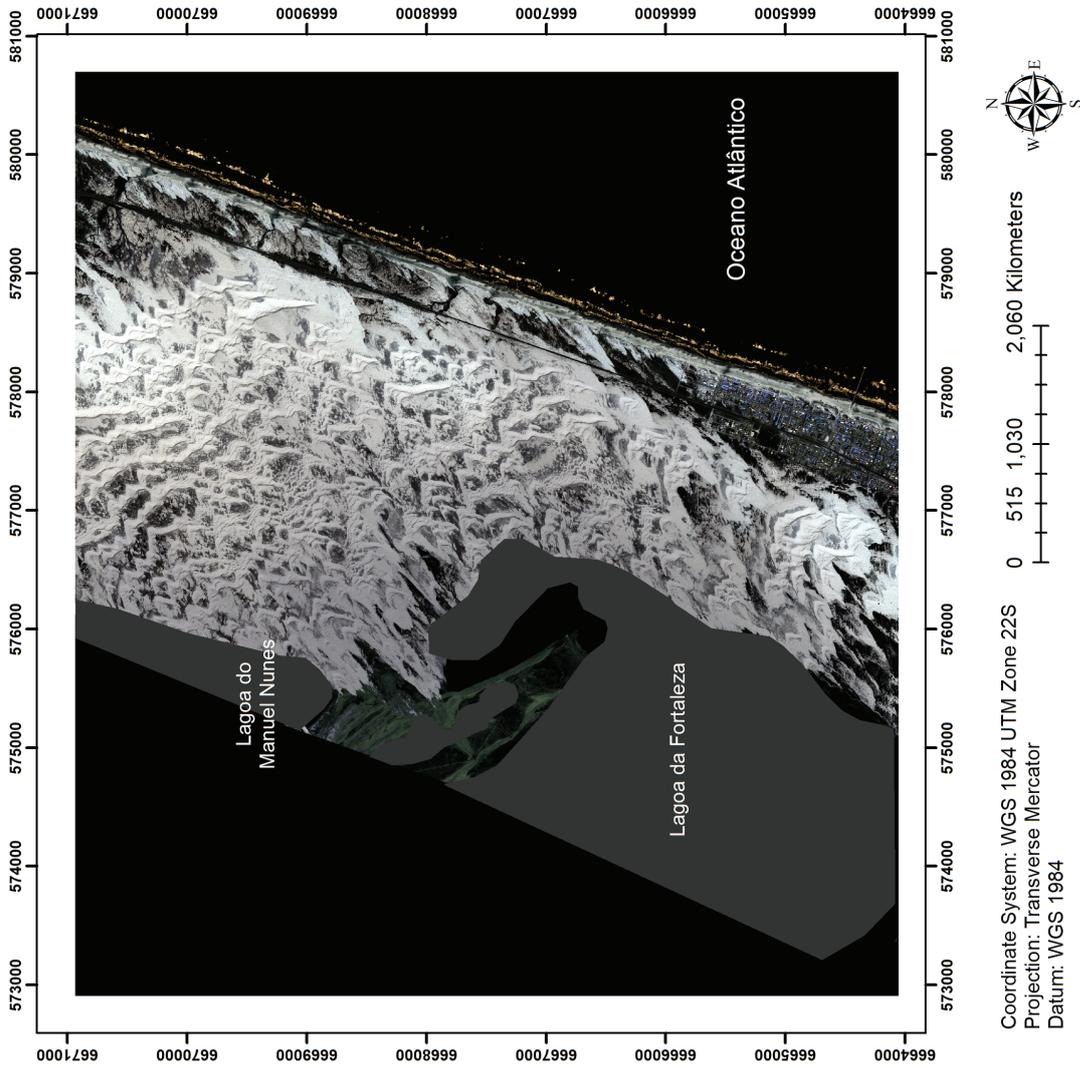


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo no litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil.  
Figure 1. Location map in the Northern littoral of Rio Grande do Sul, Brazil.

Quadro 1. Informações e características dos produtos utilizados.

Chart 1. Informations and characteristics of the utilized products.

|                        | <b>Quickbird</b>  | <b>MDS – SRTM</b>                    |
|------------------------|---|--------------------------------------|
| Tipo                   | Imagem óptica   | Relevo                               |
| Resolução Espectral    | Azul (0,45 – 0,54 $\mu\text{m}$ )<br>Verde (0,52 – 0,6 $\mu\text{m}$ )<br>Vermelho (0,63 – 0,69 $\mu\text{m}$ )<br>IV (0,76 – 0,90 $\mu\text{m}$ )<br>PAN (0,44 – 0,9 $\mu\text{m}$ ) | BANDA C (5,8 cm)<br>BANDA X (3,1 cm) |
| Resolução Espacial     | Multiespectral = 2,5 m<br>Pancromática = 0,6 m  | 30 a 90 m                            |
| Resolução Radiométrica | 11 BITS (2048 níveis)   | -                                    |
| Resolução Temporal     | 1 a 3,5 dias  | Passagem única<br>(Fev/2000)         |

### 3 Resultados e Discussões

A área localizada no Sistema Laguna-Barreira IV, da Planície Costeira do Rio Grande do Sul, pode ser dividida em subsistemas deposicionais, incluindo, na Barreira, os subsistemas praias e eólico e, no Lagunar, os subsistemas deltaico, cordões lagunares e lagoas costeiras. Cada subsistema apresenta elementos arquiteturais com formas e refletância distintas que permitem distingui-los. O quadro 2 apresenta as características consideradas para a interpretação dos sistemas deposicionais presentes na região.

A partir das características selecionadas, foi realizado o mapeamento visual dos elementos presentes na área de estudo, exibido na figura 2.

A barreira costeira apresenta praias não-urbanizadas, com estágio morfodinâmico intermediário. Os sangradouros, responsáveis pela drenagem das águas pluviais acumuladas na retaguarda das dunas frontais, provocam a erosão das dunas pelo curso do canal e causam a segmentação e desestabilização do cordão de dunas frontais (Figueiredo & Calliari 2006; Figueiredo *et al.*, 2007; Calliari *et al.*, 2010). Tais canais de ligação rompem a barreira, exercendo papel na troca sedimentar (Serpa *et al.*, 2011).

A partir dessas regiões de ruptura é possível observar a formação de faixas arenosas alongadas, com sentido NE-SW, que se estendem até a planície de deflação (zona de dunas vegetadas que separa a praia do campo de dunas transgressivo). Essas faixas, denominadas de corredores de alimentação, caracterizam-se por apresentar cobertura vegetal esparsa,

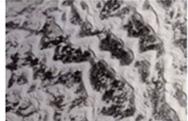
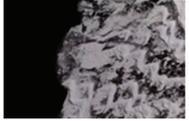
permitindo o transporte do sedimento da praia até o campo de dunas (Tomazelli *et al.*, 2008). A presença dos corredores de alimentação garante que o campo de dunas continue ativo, já que fornecem os sedimentos para sua manutenção. Por ser uma das únicas regiões da planície costeira do Rio Grande do Sul onde a falta de urbanização permite o estabelecimento dessas faixas arenosas, a área possui alta prioridade de preservação.

O campo de dunas transgressivo, com área aproximada de 31,4 km<sup>2</sup>, é composto por diferentes elementos arquiteturais, incluindo cadeias barcanóides, barcanas isoladas e dunas parabólicas. As regiões de interdunas apresentam vegetação rala e abrigam corpos temporários de água em períodos chuvosos (Tomazelli *et al.*, 2003). O tamanho expressivo do campo, segundo Tomazelli *et al.* (2008), é favorecido pela combinação de um relevo baixo (PCRS), da presença de ventos com sentido e intensidade favoráveis e de um grande estoque de sedimentos arenosos.

As dunas eólicas não vegetadas migram para o interior do continente, recobrando terrenos mais antigos (Gardner, 1955; Hesp & Thom, 1990). A posição das cristas das dunas mapeadas indica um sentido de transporte de NE para SO, comprovando a movimentação do campo em direção ao continente. Segundo Dillenburg *et al.* (2013), o campo de dunas de Cidreira foi formado em decorrência da disponibilização de sedimentos pela erosão costeira, que provocou a transgressão da linha de costa e permitiu o transporte de areia para o interior do continente.

O formato das dunas indica uma evolução

Quadro 2. Características e composição dos sistemas deposicionais.  
 Chart 1. Characteristics and depositional systems composition.

|                         | BARREIRA  |  | LAGUNAR   |  |   |
|-------------------------|---|--|---|--|---|
|                         | EÓLICO  | PRAIAL   | DELTA   | CORDÕES  | LAGOAS  |
| Identificadores         | Alta refletância;<br>Relevo ondulado;<br>Altitude entre 8 e 18 metros;<br>Textura rugosa e irregular  | Refletância média<br>Relevo plano e forma linear contínua;<br>Textura lisa;<br>Tons mais escuros | Formas sinuosas e contínuas.<br>Canais de drenagem meandrantés e entrelaçados.                    | Textura aveludada;<br>Forma (alinhamentos contínuos com tonalidade clara e escura alternada) | Formas arredondadas;<br>Baixa refletância;<br>Textura lisa                            |
| Elementos arquiteturais | Cadeias barcanóides;<br>Dunas barcanas isoladas;<br>Dunas parabólicas;<br>Lençóis de dunas;<br>Interdunas;<br>Planície de deflação;<br>Corredores de alimentação; | Dunas frontais (escarpadas por sangradouros);<br>Pós-praia                                       | Canais;<br>Planície deltaica;<br>Frente deltaica;   | Cordões paralelos dispostos perpendicularmente à costa                                       | Corpo d'água  |
| Interpretação           | Campo de dunas transgressivo com presença de corredores de alimentação ativos   | Praia natural não urbanizada com presença de sangradouros responsáveis pela drenagem             | Feições formadas dentro das lagoas costeiras a partir da drenagem do campo de dunas transgressivo | Crescimento de esporões arenosos dentro do corpo lagunar, segmentando as lagoas costeiras    | Sistema lagunar   |
| Exemplo                 |    |               |                |         |  |

das feições ao longo do campo: presença de cadeias barcanóides ao norte, passando para barcanas isoladas e terminando em lençóis e dunas parabólicas ao sul. Martinho *et al.* (2010), ao estudarem os estágios de evolução das dunas no Rio Grande Sul, descobriram que as mesmas são governadas pela umidade, energia do vento e disponibilidade de sedimentos. A modificação desses parâmetros é responsável por modificar a morfologia das dunas.

O sistema lagunar apresenta lagoas costeiras denominadas por Delaney (1965) de lagoas em rosário, que são resultado da segmentação de uma lagoa maior pelo

crescimento de esporões arenosos (Zenkovitch, 1959). Segundo Tomazelli *et al.* (2011), muitos desses corpos de água apresentam terraços, emersos e submersos, em suas margens. Os terraços lagunares emersos são limitados por linhas de estabilização do nível lagunar (paleolinhas de praia/escarpas – Barboza & Tomazelli, 2003), e muitas vezes marcadas pela presença de lençóis de areias transgressivos.

De acordo com Barboza & Rosa (2014), nos setores em que as lagoas ocorrem imediatamente na retaguarda da barreira holocênica encontra-se uma série de depósitos formados pela interação entre o sistema lagunar e o eólico. Essa

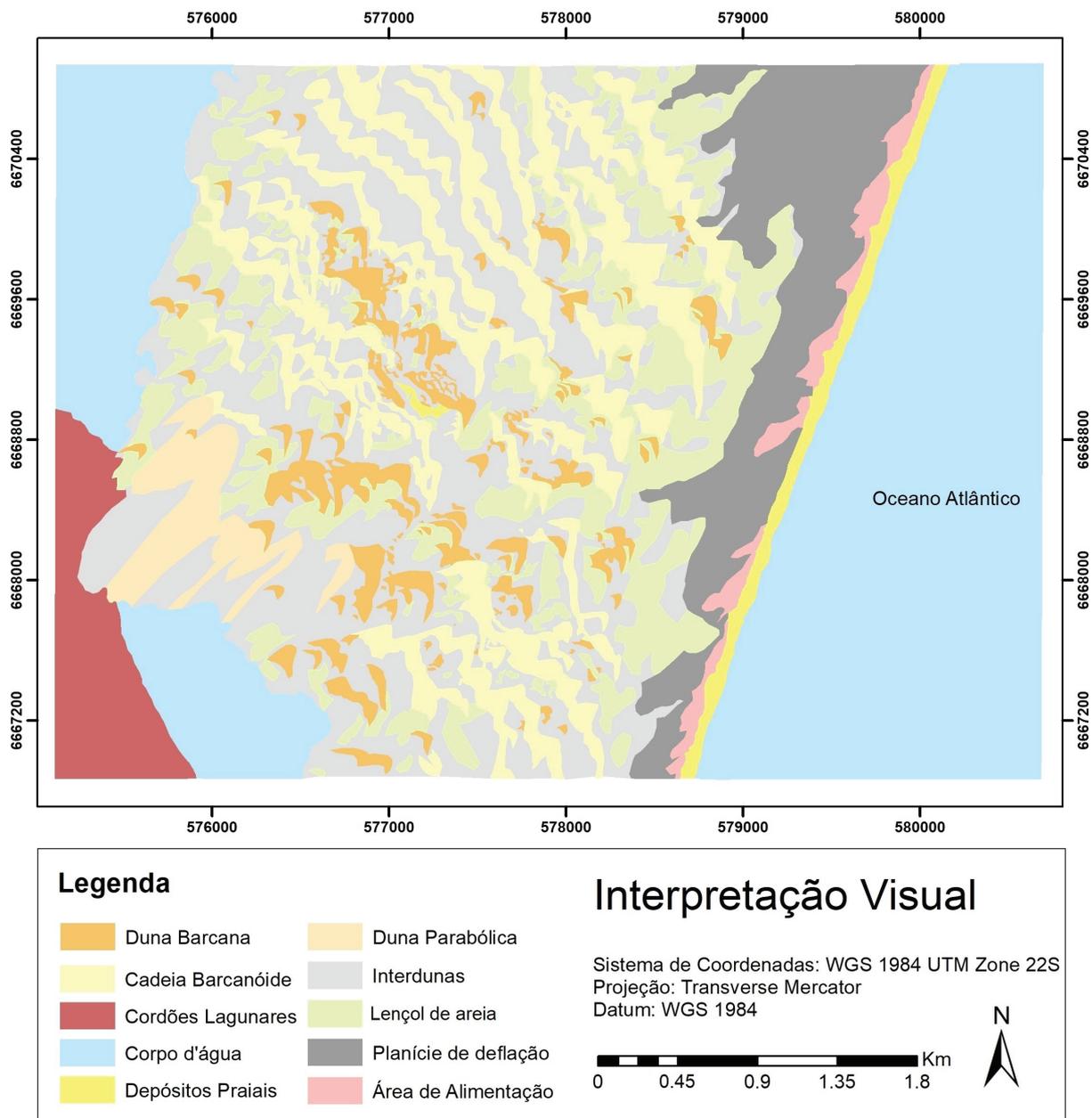


Figura 2. Mapeamento realizado a partir da vetorização dos elementos de interpretação visual.  
 Figure 2. Map created through the vectorization of the elements of visual interpretation.

interação, responsável pela transferência dos sedimentos arenosos da barreira para o corpo lagunar adjacente, ocorre como resultado de dois mecanismos principais: a migração direta das dunas para dentro dos corpos lagunares e a progradação de deltas alimentados por cursos de água temporários que se desenvolvem nas interdunas (Tomazelli et al., 2013).

A migração das dunas para dentro do corpo lagunar, promovida pelo vento nordeste, fornece

sedimentos para a composição das margens e contribui para a colmatação da lagoa. A migração dos deltas, por sua vez, ocorre lateralmente de acordo com a migração do próprio campo de dunas e interdunas (Lima et al., 2013; Barboza & Rosa, 2014; Rosa et al., 2016).

Após a interpretação visual foi realizada a classificação automática, cujo resultado pode ser visualizado na figura 3.

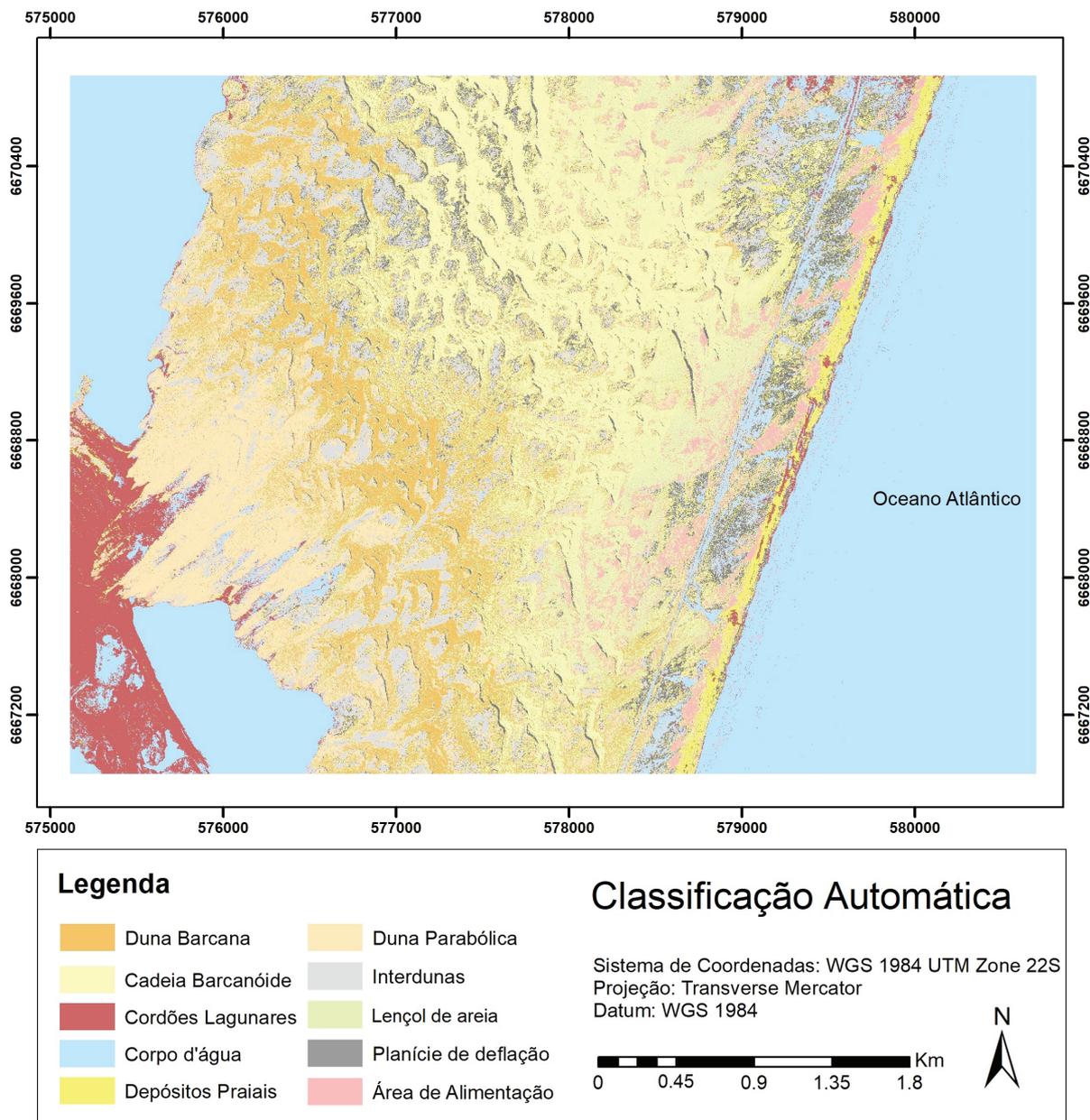


Figura 3. Classificação automática dos elementos arquiteturais utilizando o método "Maximum Likelihood Classification".  
 Figure 3. Automatic classification of the architectural elements using Maximum Likelihood Classification method.

Na classificação é possível visualizar a evolução dos campos de dunas, começando com as cadeias barcanóides, passando para dunas barcanas e finalizando com dunas parabólicas. Os lençóis de areia, ao contrário da figura 2, não estão claramente identificados. Também é possível visualizar os corredores de alimentação na planície de deflação, formados a partir da ruptura do cordão de dunas frontais, ligando a praia ao campo de dunas.

Visualmente, as principais diferenças entre o mapeamento de reconhecimento e a

classificação automática incluem a região de interdunas e a planície de deflação. O interdunas no mapeamento manual foi considerado toda e qualquer região entre as dunas, devido à dificuldade em distinguir visualmente os pixels dessa região. Na classificação automática, no entanto, o interdunas diminuiu enquanto as outras classes aumentaram, principalmente as dunas barcanas e parabólicas. A planície de deflação, por sua vez, foi classificada parcialmente como interdunas e corpo d'água na classificação automática.

O quadro 3 apresenta uma comparação, do percentual mapeado para cada classe, entre o mapeamento de reconhecimento (assinatura) e a classificação automática. Através da comparação, podemos confirmar que houve uma diferença significativa entre os mapeamentos, dando destaque para a região de interdunas, que caiu de 22.7%, no mapeamento de reconhecimento, para 9% na classificação automática. Essa variação se justifica pela dificuldade de diferenciar, visualmente, a porção final das dunas e os lençóis da região interdunas, ao passo que, na classificação automática, a quantificação do valor do pixel torna esse processo mais fácil. A diminuição na área mapeada como interdunas, por sua vez, provocou o aumento do percentual das outras classes, causando as diferenças encontradas.

Quadro 3. Comparação do percentual mapeado para cada classe, entre o mapeamento visual de reconhecimento (assinatura) e a classificação automática.

Chart 3. Percentage comparison for each class, between the visual mapping and the automatic classification

| Elemento             | Assinatura | Classificação |
|----------------------|------------|---------------|
| Área alimentação     | 1.28%      | 4.00%         |
| Cadeia barcanóide    | 12.36%     | 13.00%        |
| Cordões lagunares    | 3.53%      | 4.00%         |
| Depósitos praias     | 1.46%      | 4.00%         |
| Duna barcana         | 4.60%      | 9.00%         |
| Duna parabólica      | 2.36%      | 13.00%        |
| Interdunas           | 22.77%     | 9.00%         |
| Corpo d'água         | 31.70%     | 35.00%        |
| Lençóis de dunas     | 11.30%     | 9.00%         |
| Planície de deflação | 8.05%      | 4.00%         |

Inicialmente, foi feita uma tentativa de divisão da classe corpo d'água em lagoa e oceano, porém, os resultados não se mostraram satisfatórios, havendo bastante confusão entre as classes. Além disso, a diferença de percentual entre os mapeamentos ocorre devido à classificação das depressões como corpos d'água na classificação automática.

Através da matriz de erros (quadro 4), foram calculados a acurácia geral do mapeamento, a precisão do produtor (ou erro de omissão), a precisão do usuário (ou erro de comissão) e o coeficiente Kappa da amostra. Segundo Bolfe et al. (2004), a matriz de erros permite observar e avaliar as divergências ocorridas entre as classes

temáticas, sendo o índice Kappa um parâmetro consistente por envolver o valor final de todas as células da matriz. A acurácia geral, calculada através da divisão da soma da diagonal principal (acertos) pelo o número total de amostras, apresentou valor 0,61. O coeficiente Kappa, por sua vez, utiliza todos os elementos da matriz de confusão em seu cálculo e tem como objetivo determinar quão efetivamente os pixels foram agrupados nas classes definidas. O valor obtido, 0,56, pode ser classificado como bom (segundo Fonseca, 2000), indicando que o método de classificação por máxima verossimilhança apresentou resultados satisfatórios.

A precisão do produtor e do usuário são medidas da acurácia individual de cada classe e são obtidas através da divisão do número correto da categoria pelo total da categoria. A precisão do produtor indica a probabilidade de um pixel ser corretamente classificado, enquanto a precisão de usuário indica a probabilidade de um pixel classificado na imagem realmente representar aquela categoria no campo (Congalton, 1991).

Pela precisão do produtor é possível observar que as classes com maior percentual de erro, possuindo menos de 40% de chance de serem classificadas corretamente, foram as dunas barcanas, interdunas e a planície de deflação. A precisão do usuário, por sua vez, realça a dificuldade em diferenciar os limites entre a cadeia bacanoide e a duna barcana isolada.

Dificuldades enfrentadas durante o processo de classificação também foram enfrentadas por outros autores. De Giglio et al. (2019), por exemplo, encontraram índice Kappa 0,64 ao classificar a vegetação de dunas costeiras pelo método *Maximum Likelihood*. Os autores afirmam que um mesmo tipo de objeto (como areia ou grama) pode estar contido em muitas classes e, portanto, alguns pixels podem ser classificados diferentemente dos pixels adjacente, diminuindo a acurácia.

Segundo Pinho et al. (2005) classes que apresentam comportamento espectral semelhante podem apresentar confusão na classificação por máxima verossimilhança. Os autores, ao classificar alvos urbanos em imagem de alta resolução espacial, encontraram confusão entre as classes solo exposto e concreto devido

Quadro 4. Matriz de confusão, com os totais de cada classe e as precisões respectivas.  
 Chart 4. Confusion matrix with the totals from each class and the precisions.

|                      | Planície de deflação | Cadeia Barcanóide | Duna Barcana | Lençóis de dunas | Duna parabólica | Interdunas | Depositos praias | Área de alimentação | Corpo d'água | Cordões lagunares | Total | Precisão do Usuário |
|----------------------|----------------------|-------------------|--------------|------------------|-----------------|------------|------------------|---------------------|--------------|-------------------|-------|---------------------|
| Planície de deflação | 12                   | 0                 | 0            | 0                | 0               | 7          | 2                | 1                   | 0            | 0                 | 22    | 54.6                |
| Cadeia barcanóide    | 0                    | 27                | 13           | 28               | 0               | 7          | 0                | 2                   | 0            | 0                 | 77    | 35.1                |
| Duna barcana         | 1                    | 6                 | 10           | 6                | 6               | 5          | 0                | 1                   | 0            | 0                 | 35    | 28.6                |
| Lençóis de dunas     | 2                    | 5                 | 2            | 30               | 1               | 1          | 1                | 5                   | 0            | 0                 | 47    | 63.8                |
| Duna parabólica      | 0                    | 0                 | 6            | 2                | 20              | 2          | 0                | 2                   | 0            | 0                 | 32    | 62.5                |
| Interdunas           | 8                    | 0                 | 1            | 0                | 0               | 12         | 1                | 1                   | 1            | 0                 | 24    | 50.0                |
| Depósitos praias     | 3                    | 1                 | 0            | 0                | 0               | 0          | 22               | 0                   | 0            | 1                 | 27    | 81.5                |
| Área de alimentação  | 1                    | 1                 | 0            | 8                | 0               | 0          | 3                | 18                  | 2            | 0                 | 33    | 54.6                |
| Corpo d'água         | 6                    | 0                 | 0            | 0                | 0               | 0          | 1                | 0                   | 64           | 0                 | 71    | 90.1                |
| Cordões lagunares    | 1                    | 0                 | 0            | 0                | 0               | 0          | 1                | 0                   | 0            | 30                | 32    | 93.8                |
| Total                | 34                   | 40                | 32           | 74               | 27              | 34         | 31               | 30                  | 67           | 31                | 400   |                     |
| Precisão Produtor    | 35.3                 | 67.5              | 31.3         | 40.5             | 74.1            | 35.3       | 71.0             | 60.0                | 95.5         | 96.8              |       |                     |

à grande variabilidade espectral. Verbovšek & Popit (2018) afirmam que, para deslizamentos, o método não é eficaz na distinção de unidades litogeomorfológicas que apresentam elevação, rugosidade e declividade similares.

Outra dificuldade está relacionada às diferenças na resolução espacial das imagens, que podem levar a uma superestimativa ou subestimativa das áreas de cada classe. Queiroz *et al.* (2017), ao comparar os resultados da classificação supervisionada do uso e cobertura do solo na região central do Rio Grande do Sul para imagens com diferentes resoluções espaciais (Landsat e RapidEye), verificaram que houve diferença no percentual de área mapeada para cada classe entre as imagens. Além disso, o coeficiente Kappa para a imagem Landsat apresentou valor 0,59, enquanto a imagem RapidEye apresentou valor 0,73.

Santos & Costa e Oliveira (2016), ao usar uma imagem Landsat para a distinção de corpos d'água no litoral sul do Rio de Janeiro através de classificação automática pixel-a-pixel, encontraram índice Kappa de 0,98 para o método de máxima verossimilhança. Os poucos erros

foram encontrados principalmente em zonas costeiras, onde houve alguma mistura entre as classes. Santos *et al.* (2019) obtiveram índice Kappa de 0,967 ao avaliar o uso e ocupação do solo no município de Presidente Médici em Rondônia e afirmam que o método é apto para essa avaliação.

É importante ressaltar que a classificação automática foi realizada com base apenas nas imagens ópticas, que consideram, basicamente, os tipos de cobertura presentes na superfície do terreno. Como a cobertura tem relação com a geologia, pode-se dizer que há uma correspondência parcial entre a cobertura e os elementos arquiteturais presentes. Contudo, conforme testado por Rosa *et al.* (2014), o uso do MDS combinado à imagem óptica seria útil para diferenciar tanto áreas com a mesma cobertura (mas que são elementos de unidades geológicas distintas), quanto elementos que possuem variações no tipo de cobertura (mas correspondem à mesma unidade geológica). Porém, a resolução espacial do MDS prejudica o resultado obtido, diminuindo a qualidade final e tornando o mapa com aspecto pixelado.

## 5 Conclusões

A análise qualitativa da correspondência entre os elementos vetorizados e a classificação automática indicou uma correspondência geral das classes delimitadas, indicando que o método selecionado foi eficaz no mapeamento dos sistemas deposicionais e dos elementos arquiteturais presentes na região de estudo. O índice Kappa apresentou valor 0,56, enquanto a acurácia geral do mapeamento foi 61%. Apesar de ser considerado bom, a matriz apresentou bastante confusão em algumas classes. As classes que apresentaram maior confusão foram: planície de deflação e interdunas; e cadeia barcanóide e barcanas isoladas.

Os resultados aqui obtidos mostram que o sensoriamento remoto é uma ferramenta eficiente na classificação de feições, podendo ser utilizado em diversas áreas e com distintas finalidades, como no entendimento da evolução geológica local ou no auxílio à tomada de decisões no âmbito do gerenciamento costeiro. O uso de um MDS com alta resolução espacial, associado à imagem óptica, poderia ajudar a diferenciar as classes com maior confusão, melhorando a acurácia da classificação.

**Agradecimentos.** Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNP) pela bolsa de pós-graduação e pela bolsa de produtividade em pesquisa (Processo nº 307467/2019-8).

## Referências

- Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., 2003. Erosional features of the eastern margin of the Patos Lagoon, southern Brazil: significance for Holocene history. *Journal of Coastal Research*, SI 35: 260-264.
- Barboza, E.G. & Rosa, M.L.C. 2014. Indicadores geológicos e geomorfológicos de setores em erosão na costa do Rio Grande do Sul, Brasil. In: Goso, C. (Ed). *Nuevas miradas a la problemática de los ambientes costeros*. Montevideo, DIRAC, p. 83-98.
- Bolfe, E.L., Pereira, R.S., Madruga, P.R.A. & Fonseca, E.L. 2004. Avaliação da classificação digital de povoamentos florestais em imagens de satélite através de índices de acurácia. *Revista Árvore*, 28(1): 85-90.
- Calliari, L.J., Guedes, R.M.C., Pereira, P.S., Lélis, R.F., Antiqueira, J.A. & Figueiredo, S.A. 2010. Perigos e Riscos associados a processos costeiros no Litoral Sul do Brasil (RS): uma síntese. *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 14(1): 51-63.
- Câmara, G., Souza, R.C.M., Freitas, U.M. & Garrido, J. 1996. Spring: Integrating remote sensing and GIS by object-oriented data modelling. *Computers & Graphics*, 20(3): 395-403.
- Congalton, R.G. 1991. A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing Environment*, 37: 35-46.
- De Giglio, M., Greggio, N., Goffo, F., Merloni, N., Dubbini, M. & Barbarella, M. 2019. Comparison of pixel- and object-based classification methods of unmanned aerial vehicle data applied to coastal dune vegetation communities: Casal Borsetti case study. *Remote sensing*, 11(1416): 1-21.
- Delaney, P. 1965. Fisiografia e geologia de superfície da Planície Costeira do Rio Grande do Sul. *Publicação Especial da Escola de Geologia*. UFRGS, 6: 1-195.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Hesp, P.A., Clerot, L.C.P. & Ayup-Zouain, R.N. 2009. The Holocene Coastal Barriers of Rio Grande do Sul. In: Dillenburg, S.R. & Hesp, P.A (Eds.). *Geology and geomorphology of Holocene coastal barriers of Brazil*. Lecture Notes in Earth Sciences, 107, p. 53-91.
- Dillenburg, S.R., Barboza, E.G., Tomazelli, L.J., Rosa, M.L.C.C. & Maciel, G.S. 2013. Aeolian deposition and barrier stratigraphy of the transition region between a regressive and a transgressive barrier: an example from Southern Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 65: 464-469.
- Figueiredo, S.A. & Calliari, L.J. 2005. Sangradouros: Distribuição espacial, variação sazonal, padrões morfológicos e implicações no gerenciamento costeiro. *Gravel*, 3: 47-57.
- Figueiredo, S.A. & Calliari, L.J. 2006. Washouts in the central and northern litoral of Rio Grande do Sul State, Brazil: Distribution and Implications. *Journal of Coastal Research*, SI 39: 366-370.

- Figueiredo, S.A., Cowell, P. & Short, A. 2007. Intermittent backbeach discharge to the surfzone: modes and geomorphologic implications. *Journal of Coastal Research*, SI 50: 610-614.
- Figueiredo, G.C. & Vieira, C.A.O. 2007. Estudo do comportamento dos índices de exatidão global, Kappa e Tau, comumente usados para avaliar a classificação de imagens de sensoriamento remoto. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 12., 2007, Florianópolis. *Anais...Florianópolis*, INPE, p. 5755-5762.
- Fisher, W.L. & McGowen, J.H. 1967. Depositional systems in the Wilcox group of Texas and their relationship to occurrence of oil and gas. *Transactions of the Gulf Coast association of geological societies*, 5(17): 105-125.
- Fonseca, L.M.G. 2000. *Processamento digital de imagens*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 105p.
- Gardner, D.E. 1955. Beach-sand heavy-mineral deposits of Eastern Australia. *Bureau of Mineral Resources, Geology and Geophysics Bulletin*, 28: 1-103.
- Hesp, P.A. & Thom, B.G. 1990. Geomorphology and evolution of active transgressive dunefields. *In: Nordstrom, K.F., Psuty, N.P. & Carter, B. (Eds.). Coastal Dunes: Form and Processes*. London, John Wiley, p. 253-288.
- Lima, L.G., Dillenburg, S.R., Medeanic, S., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Tomazelli, L.J., Dehnhardt, B.A. & Caron, F. 2013. Sea-level rise and sediment budget controlling the evolution of a transgressive barrier in southern Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 42: 27-38.
- Martinho, C.T., Hesp, P.A. & Dillenburg, S.R. 2010. Morphological and temporal variations of transgressive dunefields of the northern and mid-littoral Rio Grande do Sul coast, Southern Brazil. *Geomorphology*, 117: 14-32.
- Meneses, P.R. & Sano, E.E. 2012. Classificação Pixel a Pixel de Imagens. *In: Meneses, P.R. & Almeida, T (Eds.). Processamento de Imagens de Sensoriamento Remoto*. Brasília, Universidade de Brasília, p. 191-208.
- Miall, A.D. 1985. Architectural-element analysis: a new method of facies analysis applied to fluvial deposits. *Earth science Reviews*, 22: 261-308.
- Miall, A.D. 1988. Architectural elements and bounding surfaces deposits: anatomy of Kayenta formation (Lower Jurassic), Southwest Colorado. *Sedimentary Geology*, 55: 233-262.
- Norovsuren, B., Tseveen, B., Batomunkuev, V., RENCHIN, T., Natsagdorj, E., Yangiv, A. & Mart, Z. 2019. Land cover classification using maximum likelihood method (2000 and 2019) at Khandgait valley in Mongolia. IOP Conference Series: *Earth and Environmental Science*, 381(1): 1-6.
- Pinho, C.M.D., Feitosa, F.F. & Kux, H. 2005. Classificação automática de cobertura do solo urbano em imagem IKONOS: Comparação entre a abordagem pixel-a-pixel e orientada a objetos. *In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO*, 7., 2005, Goiânia. *Anais... Goiânia*, INPE, p. 4217-4224.
- Queiroz, T.B., Sousa, R.S., Baldin, T., Batista, F.J., Marchesan, J., Pedrali, L.D. & Pereira, R.S. 2017. Avaliação do desempenho da classificação do uso e cobertura da terra a partir de imagens Landsat 8 e Rapideye na região central do Rio Grande do Sul. *Geociências*, 36(3): 569-578.
- Rosa, M.L.C.C. 2012. *Geomorfologia, estratigrafia de sequências e potencial de preservação dos sistemas Laguna-Barreira do quaternário costeiro do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, 251p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Ayup-Zouain, R.N., Rockett, G.C. & Silva, A.B. 2014. Caracterização geológica da região entre a Lagoa do Peixe e São José do Norte, litoral médio do Rio Grande do Sul (Brasil), através de dados de sensoriamento remoto. *In: CONGRESSO GEOLÓGICO ARGENTINO*, 19., 2014, Córdoba. *Actas... Córdoba*, 1 CD-ROM, p. S12-37.
- Rosa, M.L.C.C., Hoyal, D.C., Barboza, E.G., Fedele, J. & Abreu, V.S. 2016. River-dominated deltas: upscaling autogenic and allogenic processes observed in laboratory experiments to field examples of small deltas in southern Brazil. *In: Budd, D.A., Hajek, E.A., Purkis, S.J. (Eds.)*

- Autogenic Dynamics and Self-Organization in Sedimentary Systems*. SEPM Special Publication 106, p. 176-197.
- Rosa, M.L.C.C., Barboza, E.G., Abreu, V., Tomazelli, L.J. & Dillenburg, S.R. 2017. High-Frequency Sequences in the Quaternary of Pelotas Basin (coastal plain): a record of degradational stacking as a function of longer-term base-level fall. *Brazilian Journal of Geology*, 47(2):183-207.
- RS.RioGrandedoSul. 2020. *Atlas socioeconômico do Rio Grande do Sul*. 5ª ed., Porto Alegre, Secretaria de Planejamento, Governança e Gestão, 205p.
- Santos, G.D. & Costa e Oliveira, R.A.A. 2016. Classificação pixel a pixel aplicada à discriminação de corpos d'água em imagem Landsat 8. *Revista Militar de Ciência e Tecnologia*, 33(1): 5-8.
- Santos, A. S. R. M., Mauro, T. L., Souza, L. A., Senigalia, R. L. C., Castro, D. A. & Santos, E. S. 2019. Métodos de classificação supervisionada aplicados no uso e ocupação do solo no município de Presidente Médice–RO. *Biodiversidade*, 18(1): 150-159.
- Serpa, C.G., Romeu, M.A.R., Fontoura, J.A.S., Calliari, L.J., Melo, E. & Albuquerque, M.G. 2011. Study of the responsible factors for the closure of an intermittent washout during a storm surge, Rio Grande do Sul, Brazil. *Journal of Coastal Research*, SI 64: 2068-2073.
- Tomazelli, L.J. & Villwock, J.A. 2000. O Cenozóico no Rio Grande do Sul: geologia da Planície Costeira. In: Holz, M. & De Ros, L.F. (Eds.). *Geologia do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre, CIGO/URFGS, p. 375-406.
- Tomazelli, L.J., Villwock, J.A., Dillenburg, S.R., Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1998. Significance of present day coastal erosion and marine transgression, Rio Grande do Sul, Southern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 70(2): 221-230.
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G. & Strim, J. 2003. O sistema de dunas eólicas transgressivas do litoral norte do Rio Grande do Sul: situação atual e definição de áreas prioritárias à preservação. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 9., 2003, Recife. *Anais... Recife, ABEQUA*, 1 CD-ROM.
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R., Barboza, E.G. & Rosa, M.L.C.C. 2008. Geomorfologia e potencial de preservação dos campos de dunas transgressivos de Cidreira e Itapeva, litoral norte do Rio Grande do Sul, Brasil. *Pesquisas em Geociências*, 35(2): 47-55.
- Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R., Barboza, E., Rosa, M.L.C.C., Manzolli, R.P. & Caron, F. 2013. Processos de transferência de sedimentos durante a transgressão de barreiras arenosas costeiras: o exemplo da costa do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 14., 2013, Natal. *Anais... Natal, ABEQUA*, 1 CD-ROM.
- Tomazelli, L.J., Barboza, E.G., Rosa, M.L.C.C., Dillenburg, S.R., Caron, F. Manzolli, R.P. & Lima, L.G. 2011. Terraços lagunares holocênicos da margem da Lagoa do Gentil, litoral norte do Rio Grande do Sul: gênese e significado para a evolução geológica regional. In: CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO, 13., 2011, Armação de Búzios. *Anais... Armação de Búzios, ABEQUA*, v.1.
- Verbovšek, T. & Popit, T. 2018. GIS-assisted classification of litho-geomorphological units using Maximum Likelihood Classification, Vipava Valley, SW Slovenia. *Landslides*, 15(7): 1415-1424.
- Wildner, W., Ramgrab, G.E., Lopes, R.D.C. & Iglesias, C.M.D.F. 2008. *Mapa Geológico do Rio Grande do Sul (SIG)*. Porto Alegre, CPRM, escala 1:750.000.
- Zenkovitch, V.P. 1959. On the genesis of cusped spits along lagoon shores. *Journal of Geology*, 67: 269-277.