

LUCAS ZOMIGNANI OLIVEIRA

**ESCOLHA DE SÍTIO AEROPORTUÁRIO COM BASE EM SIG E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP)**

Florianópolis

2018

LUCAS ZOMIGNANI OLIVEIRA

**ESCOLHA DE SÍTIO AEROPORTUÁRIO COM BASE EM SIG E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP)**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Civil do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título Engenheiro Civil.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre Hering Coelho

Florianópolis

2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Oliveira, Lucas Zomignani

Escolha de sítio aeroportuário com base em SIG e Análise Multicritério (AHP) / Lucas Zomignani Oliveira ; orientador, Alexandre Hering Coelho, 2018.

75 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Aeroportos. 3. Escolha de sítio aeroportuário. 4. Sistema de Informações Geográficas. 5. Análise Hierárquica de Processos. I. Coelho, Alexandre Hering. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

LUCAS ZOMIGNANI OLIVEIRA

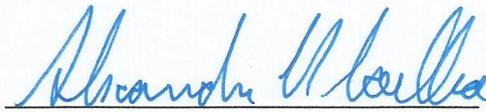
**ESCOLHA DE SÍTIO AEROPORTUÁRIO COM BASE EM SIG E
ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP)**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de Engenheiro Civil e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 25 de Junho de 2018.

Prof.^a Dr.^a Luciana Rohde
Coordenadora do Curso

Banca Examinadora



Prof. Dr. Alexandre Hering Coelho
Orientador

Prof.^a Dr.^a Liseane Padilha Thives

Dr. Edésio Elias Lopes

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Alexandre Hering Coelho, por todo o suporte e amizade oferecidos nesses últimos anos.

Aos meus pais, Fabiano Antonio de Oliveira e Liliana Zomignani de Oliveira, a minha irmã, Paula Zomignani Oliveira, e a Jorge Destri Jr., por todo o apoio e orientação durante a elaboração desse trabalho.

E a toda a minha família, amigos e outras pessoas que me ajudaram a chegar onde estou e tornam minha vida muito mais do que agradável.

RESUMO

Devido ao aumento de demanda pelo transporte aéreo no Brasil e a projeções de crescimento populacional das microrregiões de Joinville e Blumenau, polos industriais do Estado de Santa Catarina, surgiu a necessidade de se investir na estrutura aeroportuária desta região. Este trabalho visa identificar e classificar as áreas mais propícias para a implantação de um novo aeroporto regional, utilizando um Sistema de Informações Geográficas (SIG) e uma técnica de análise multicriterial (AMC). Os dados geográficos obtidos durante o processo foram separados em duas categorias: dados “restritivos”, trabalhados com lógica booleana; e dados “de possibilidades”, classificados em diferentes graus de importância com a técnica de Análise Hierárquica de Processos (AHP). O resultado foi um mapa de adequabilidade, que foi comparado com um estudo realizado em 2010 para a implantação de um aeroporto de grande porte na região norte de Santa Catarina. Embora a análise dos resultados tenha sido limitada pela quantidade de tempo disponível, as análises propostas puderam ser realizadas com o que foi desenvolvido ao longo desse estudo.

Palavras-chave: Aeroportos; Escolha de sítio aeroportuário; Sistema de Informações Geográficas; Análise Multicritério; Análise Hierárquica de Processos.

ABSTRACT

Due to the rise of the Brazilian air transport demand and projections of population growth for the micro-regions of Joinville and Blumenau, an industrial hub in Santa Catarina state, it is necessary to invest in the aerial infrastructure of the region. This work aims to identify and classify the most favorable areas for the implementation of a new regional airport, using a Geographic Information System (GIS) and a multicriteria criteria decision analysis (MCDC) technique. The geographic data obtained during the process were separated into two categories: "constrained" data, processed with Boolean logic; and "possibilities" data, classified in different degrees of importance with Hierarchical Process Analysis (AHP) technique. The result was an adequacy map, which was compared to a study conducted in 2010 for the implementation of a large airport in the northern region of Santa Catarina. Although the analysis of the results was limited by the amount of time available, the analyzes proposed could be carried out with what was developed during this study.

Keywords: Airports; Airport site selection; Geographic Information System; Multi-Criteria Analysis; Analytic Hierarchy Process.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP – Análise Hierárquica de Processos

AMC – Análise Multicritério

ANAC – Agência Nacional de Aviação Civil

APP – Área de Preservação Permanente

ASA – Área de Segurança Aeroportuária

DEINFRA – Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

FUNAI – Fundação Nacional do Índio

IAC – Instituto de Aviação Civil

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

MMA – Ministério do Meio Ambiente

PBZPA – Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo

PBZR – Plano Básico de Zoneamento de Ruído

PZR – Plano de Zoneamento de Ruído

RBAC – Regulamento Brasileiro de Aviação Civil

SFS – São Francisco do Sul

SIG – Sistema de Informação Geográfica

SNUC – Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza

SRTM – *Shuttle Radar Topography Mission*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 OBJETIVO GERAL.....	4
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 AEROPORTOS E AERÓDROMOS.....	5
2.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS.....	9
2.2.1 DADOS GEOGRÁFICOS.....	10
2.2.2 MODELOS DE REPRESENTAÇÃO.....	10
2.2.3 ÁLGEBRA DE MAPAS.....	14
2.3 ANÁLISE MULTICRITÉRIO.....	15
2.3.1 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS.....	15
3. MÉTODO	17
3.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	18
3.2 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS.....	20
3.3 LEVANTAMENTO DA BASE DE DADOS.....	21
3.4 EXECUÇÃO DA AMC.....	27
3.5 PROCESSAMENTO COM SIG.....	31
4. APLICAÇÃO DO MÉTODO	33
4.1 EXECUÇÃO DA AMC.....	33
4.2 PROCESSAMENTO COM SIG.....	35
4.2.1 CRITÉRIOS DE POSSIBILIDADE.....	36

4.2.2 CRITÉRIOS RESTRITIVOS.....	47
5. RESULTADO FINAL E DISCUSSÃO.....	55
6. CONCLUSÃO.....	62
7. REFERÊNCIAS.....	63

1. INTRODUÇÃO

Desde a revolução industrial, a expansão e a evolução tecnológica dos meios de transporte foram extraordinárias. Enquanto no século XIX elas estavam atreladas aos transportes hidroviário e ferroviário, no século XX o desenvolvimento dos transportes rodoviário e aéreo foi mais proeminente. Inicialmente vista como um instrumento de poder militar, a aviação adquiriu também um caráter comercial nos países ocidentais com o término da Primeira Guerra Mundial, em 1918. Contudo, foi após o fim da Segunda Guerra Mundial, em 1945, que a atividade de transporte de pessoas, cargas e correios por aeronaves mais se intensificou. Mesmo com o surgimento de trens de alta velocidade para o transporte de passageiros para médias distâncias, as aeronaves permanecem como o principal expoente dos meios de transporte no século XXI (FERNANDES, PACHECO, 2016).

No Brasil, o primeiro aeroporto do país foi construído em São Paulo, em 1920. Hoje, aeroportos estão presentes em todas as regiões do país e o transporte aéreo é responsável pelo traslado anual de aproximadamente 110 milhões de passageiros. Entre 2007 e 2016, o setor registrou um aumento de 84% no volume de passageiros transportados e, desde 2010, é o principal meio de transporte de passageiros para viagens interestaduais (ANAC, 2016).

Ainda de acordo com o anuário do transporte aéreo da ANAC de 2016, os aeroportos de Guarulhos e Congonhas, ambos em São Paulo, lideram o *ranking* nacional em volume de passageiros transportados anualmente. Juntos, eles foram responsáveis por 21,4% de todas as decolagens em etapas domésticas dos voos de 2016. Esses aeroportos também possuem os maiores índices de conexões entre a região sul e outros países ou outras regiões do Brasil. Na região sul, os principais aeroportos são o de Porto Alegre e o de Curitiba. Em Santa Catarina, são os de Florianópolis e Navegantes.

O Manual de Implementação de Aeroportos¹ do Instituto de Aviação Civil (IAC) dispõem que o transporte aéreo é de importância fundamental para a integração, o crescimento e a segurança nacional. Diante desses dados, é evidente que a capacidade de movimentação de pessoas e cargas é uma necessidade fundamental no desenvolvimento da sociedade de um país ou de uma região.

As microrregiões de Joinville e Blumenau, no norte do Estado catarinense, são um importante polo tecnológico e industrial, apresentando a quarta maior concentração de

¹ <http://ong.prosperustec.com.br/mprd/wp-content/uploads/2008/10/anac-manualimplementacaoogeral.pdf>, acessado em 10/06/2018.

industrias do sul do país (KLEINSCHMITT e LIMA, 2011). Juntas, elas possuem uma população total de aproximadamente dois milhões de habitantes (IBGE²), quase um terço da população total do estado (IBGE³). Essas características, somadas a expectativas de crescimento futuro, tornam imprescindíveis investimentos em infraestrutura e o aumento da oferta de transporte aéreo, seja pela implementação de novos aeroportos ou pela melhoria dos já existentes.

Contudo, é importante ressaltar que embora os aeroportos gerem uma série de benefícios, eles também impõe uma série de restrições ao aproveitamento das propriedades localizadas no seu entorno (IAC, Manual de Implantação de Aeroportos). Com o aumento do número de viagens e a introdução de aviões a jato, os aeroportos passaram a ter um impacto sonoro negativo para o meio ambiente e comunidades próximas (KAZDA, CAVES, 2015). Em decorrência disso, terminais aéreos se tornaram vizinhos indesejados. Ao mesmo tempo, a origem e o destino de pessoas e cargas raramente têm seu início ou fim em um aeroporto. Assim, fatores como distâncias, modos de transporte disponíveis para se chegar aos aeroportos e tempo de viagem influenciam sua utilização pelos usuários (FERNANDES, PACHECO, 2016).

Nesse cenário, existem diversos critérios a serem considerados na escolha de um sítio aeroportuário a fim de se minimizar os impactos sociais, econômicos e ambientais decorrentes da implantação e operação de um novo aeroporto. Rodrigue, Comtois e Slack (2017) dispõem que a implantação de novos aeroportos em algumas partes do mundo está se tornando cada vez mais difícil. Isso porque os locais disponíveis frequentemente estão tão distantes dos centros urbanos e dos negócios que sua execução levaria a deseconomias muito significativas. Além disso, os usuários do transporte aéreo também costumam ser atraídos por frequência de vôos, oferta de destinos e conveniência. Fatores como a distância do aeroporto à origem ou destino dos usuários e/ou cargas transportadas, portanto, também devem ser considerados ao se escolher uma área para sua construção. Atrelados aos elevados investimentos para a implementação de uma estrutura aeroportuária, fazem com que, além da realização de estudos socio-econômicos e de previsão de demanda, sejam necessários estudos técnicos e de impacto ambiental.

² <https://cidades.ibge.gov.br/>, acessado em 05/06/2018.

A população total dessas microrregiões foi obtida ao se somar a população de cada município que as compõem.

³ <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sc/panorama>, acessado em 05/06/2018.

Por se tratar de uma análise complexa, o uso de ferramentas adequadas pode tornar esse processo mais ágil e preciso. O suporte propiciado por computadores torna possível o uso de ferramentas como Sistemas de Informações Geográficas (SIG) para espacializar e analisar requisitos, condições e restrições presentes no processo de escolha de um sítio aeroportuário. Essa automatização computacional aliada a métodos de tomada de decisão permite uma avaliação mais rápida das vantagens e desvantagens das áreas estudadas.

Um dos melhores e mais utilizados métodos para tomada de decisão é a análise multicritério (AMC). Segundo Gdoura, Anane e Jellali (2014), foram desenvolvidos diversos métodos de AMC, mas poucos deles podem ser integrados com um SIG. Um deles é a análise hierárquica de processos (AHP). Juntas, essas ferramentas permitem a aplicação das etapas propostas por Horonjeff: a AHP considera critérios econômicos, ambientais e técnicos ao atribuir pesos a eles de acordo com sua importância para o estudo em questão; enquanto o SIG trata espacialmente esses critérios e gera mapas ilustrativos (ENGEL *et al.*, 2003 *apud* GDOURA, ANANE e JELLALI, 2014).

Gdoura, Anane e Jellali (2014) afirmam ainda que diversos estudos foram conduzidos utilizando essa combinação de SIG e AHP para a escolha de sítios para diferentes obras. São exemplos os trabalhos para a geração de diretrizes de traçado de obras lineares (LOPES, 2015) e para a determinação de localizações favoráveis à implantação de estações de carro compartilhado (SOUZA, 2017) e de aeroportos (ROBERTO, 2014), e à recarga de águas subterrâneas rasas com águas residuais tratadas (GDOURA, ANANE e JELLALI, 2014).

Este trabalho também utilizou a combinação de AHP e SIG, para identificar as áreas mais adequadas para a implantação de um novo aeroporto nas microregiões de Joinville e Blumenau.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desse trabalho é aplicar um procedimento para escolha de sítio aeroportuário através da classificação das áreas das microregiões de Joinville e Blumenau quanto à sua adequabilidade para a implantação de aeroportos comerciais por meio do método de análise hierárquica de processos em ambiente de sistemas de informações geográficas.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Como objetivos específicos foram determinados para esse trabalho os seguintes:

- a) Estudar, compreender e aplicar o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP);
- b) Exercitar o uso de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG), incluindo o processamento de camadas de dados *raster* e vetoriais, o uso de álgebra de mapas e a elaboração de mapas temáticos;
- c) Sugerir, com base na análise do mapa de atratividade gerado, uma área indicada para a construção de um novo aeroporto dentro das microrregiões de Joinville e Blumenau.
- d) Comparar os resultados obtidos nesse trabalho com os de outros estudos sobre a identificação de sítios propícios à implantação de terminais aeroportuários.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesse capítulo serão apresentados conceitos necessários para uma melhor compreensão do método aplicado e das ferramentas utilizadas no decorrer do trabalho.

2.1 AEROPORTOS E AERÓDROMOS

No regulamento de “Definições, regras de redação e unidades de medida para uso nos RBAC⁴”, a Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2018) define aeródromo como uma área destinada para pouso, decolagem e movimentação em superfície de aeronaves, incluindo edificações, instalações e equipamentos de apoio e de controle das operações aéreas. Um sítio aeroportuário é definido como toda área patrimonial de um aeródromo (ANAC, 2011) e área patrimonial (ou perímetro patrimonial) é definida como:

Área patrimonial do aeródromo (perímetro patrimonial) significa a área indicada no instrumento de outorga de exploração do aeródromo. Coincide com a área abrangida pelo Complexo Aeroportuário, que é caracterizado pelo sítio aeroportuário, descrito no instrumento de outorga de cada aeródromo, normalmente incluindo faixas de domínio, edificações e terrenos, bem como áreas ocupadas com instalações operacionais, administrativas e comerciais relacionadas ao aeródromo; (ANAC, 2016)

ANAC (2018) define aeroportos como aeródromos públicos destinados ao processamento de pessoas e/ou cargas. O professor norte americano John Kasarda (2015) complementa a definição de aeroportos ao considerá-los componentes essenciais para cidades e províncias que buscam uma economia moderna. Segundo o professor⁵, aeroportos se tornaram nós fundamentais da produção global e dos sistemas corporativos. Ao oferecer velocidade, agilidade e conectividade, os aeroportos podem ser definidos como motores poderosos do desenvolvimento econômico. Em conformidade com essa idéia, o Instituto de Aviação Civil (IAC) estipula em seu Manual de Implantação de Aeroportos que a construção de um novo aeroporto é decorrente, na maioria das vezes, das necessidades de desenvolvimento econômico de uma região.

Nesse contexto, o manual afirma ainda que a instalação de um novo aeroporto ocorre em localidades onde a infraestrutura aeroportuária atual não atende mais às necessidades da

⁴ Regulamento Brasileiro de Aviação Civil.

⁵ <http://www.aerotropolis.com/airportCities/about-the-aerotropolis>, acessado em 10/06/2018.

região, ou em localidades que ainda não dispõem de nenhum aeródromo. Para o primeiro caso contudo, é preciso primeiro verificar a possibilidade de expansão do aeroporto existente. Horonjeff *et al.* (2010) corrobora com essa condição:

The emphasis in airport planning is normally on the expansion and improvement of existing airports. However if an existing airport cannot be expanded to meet the future demand or the need for a new airport is identified in an airport system plan, a process to select a new airport site may be required. (HORONJEFF *et al.* 2010, p. 137)⁶

De acordo com Rodrigue, Comtois e Slack (2017), áreas para a construção de grandes aeroportos representam enormes compromissos de terras urbanas. Ashford, Mumayiz e Wright (2011) complementam que o tipo de uso do aeroporto e de aeronaves que ele se propõe a operar são fatores que influenciam diretamente no tamanho do sítio necessário para a sua implantação. Kazda e Caves (2015) afirmam que os parâmetros de um aeroporto devem ser selecionados com base no desempenho e nas características geométricas das aeronaves. Caso elas mudem, os aeroportos precisam se adaptar a essas novas características e necessidades. Os autores citam como exemplo as mudanças pelas quais passaram os aeroportos após o desenvolvimento tecnológico das aeronaves durante a Segunda Guerra Mundial (1939 – 1945) e após o desenvolvimento de aviões com propulsão a jato, na década de 1960.

A área ocupada por um terminal aéreo está, portanto, diretamente relacionada com o comprimento de suas pistas. Atualmente, os aeroportos com maiores extensões de pistas no Brasil são o aeroporto do Galeão, no Rio de Janeiro, e o aeroporto de Guarulhos, em São Paulo. Eles possuem pistas de, respectivamente, 4000 e 3700 metros de comprimento. O suficiente para permitir operações de pouso e decolagem dos maiores modelos existentes de aviões comerciais para o transporte de passageiros, como o Airbus A380 e Boeing 747-8.

Segundo Ashford, Mumayiz e Wright (2011), os altos volumes de tráfego terrestre gerados por aeroportos e o desenvolvimento econômico e social decorrentes de sua implantação podem não estar de acordo com o desejo das comunidades que os cercam. Para minimizar as consequências sociais e de deterioramento ambiental causadas pelos aeroportos,

⁶ A ênfase no planejamento aeroportuário está normalmente na expansão e melhoria dos aeroportos existentes. No entanto, se um aeroporto não puder ser expandido para atender a demanda futura, ou for identificada a necessidade de um novo aeroporto, um processo de seleção de um novo sítio aeroportuário pode ser necessário (tradução nossa).

os autores recomendam que, independentemente do contexto político, uma mínima análise de escolha de sítio aeroportuário considere os seguintes fatores:

- Capacidade operacional – incluindo o espaço aéreo, obstruções e o clima;
- Potencial de capacidade – incluindo o clima e a extensão de terras disponíveis apropriadas para a construção do aeroporto;
- Acesso terrestre – incluindo a distância da demanda por serviços aéreos, de rodovias, transporte público e estacionamentos;
- Custos para implantação – incluindo o preço e o valor do terreno, a natureza do solo e das rochas, o relevo, o clima e a oferta de serviços;
- Consequências ambientais – incluindo o ruído gerado pelos aviões, o impacto na fauna e na flora, a qualidade do ar, as mudanças no uso da terra ao seu redor, a existência de espécies ameaçadas ou de artefatos culturais;
- Fatores sociais – incluindo a realocação de famílias e negócios, mudanças no mercado de trabalho, mudanças em impostos e a necessidade de novos serviços públicos;
- Consistência com o planejamento aéreo regional ou nacional – incluindo os impactos no uso da terra e a oferta de transporte local e regional.

Horonjeff et al. (2010) complementam essas afirmações ao escreverem que os estudos a serem realizados com o propósito de escolher uma área para a construção de um novo aeroporto devem conter as seguintes etapas:

1. Identificação de critérios e dos locais que possam atendê-los;
2. Eliminação de áreas com incompatibilidades muito evidentes quanto a características topográficas, obstruções naturais ou artificiais, influência de outros aeroportos no espaço aéreo, impactos ambientais, custos e;
3. Avaliação numérica dos pesos dos critérios e eleição de um local.

No Brasil, de acordo com a RBAC nº 154 (ANAC, 2018), a escolha de um local para a construção da pista é uma parte muito importante na determinação do sítio para a construção de um aeródromo. Segundo essa RBAC, existem muitos fatores que afetam a determinação da localização, da orientação e do número de pistas de pouso e decolagem de um aeródromo.

Dois dos mais importantes são o fator de utilização, determinado pela distribuição do vento, e o fator de alinhamento da pista para permitir aproximações em conformidade com as Superfícies Limitadoras de Obstáculos⁷. O aeródromo deve ser construído de forma que a quantidade e a orientação das pistas de pouso e decolagem garanta que o fator de utilização do aeródromo não seja menor que 95 por cento. Ao mesmo tempo, o posicionamento e a orientação das pistas de pouso e decolagem devem ser tais que as trajetórias de chegada e saída das aeronaves minimizem a interferência do ruído produzido pelas aeronaves em áreas de uso residencial e outras áreas sensíveis ao ruído aeronáutico na vizinhança do aeródromo.

Para garantir a segurança e a regularidade das operações aéreas, e evitar interferência nos sinais dos equipamentos utilizados para a condução das operações de pouso e decolagem, a Portaria nº 957 (BRASIL, 2015) estabelece a necessidade da elaboração de um Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo (PBZPA). Esse plano é definido em função das Superfícies Limitadoras de Obstáculos e prevê gabaritos com gradientes máximos no eixo da pista, a partir de sua cabeceira, para possibilitar rampas de pouso e decolagem livres de obstáculos na vizinhança do aeroporto. Em outras palavras, a altura de obstáculos (sejam eles naturais, como montanhas, ou construídos, como prédios) próximos a aeródromos deve ser limitada para que as operações de pouso e decolagem não sejam prejudicadas.

Outro fator importante para a segurança das operações aéreas é o controle da fauna nas imediações dos aeródromos. A Lei Nº 12.725 de 2012 estabelece Áreas de Segurança Aeroportuária (ASA) para a redução do risco de acidentes aeronáuticos decorrentes da colisão de aeronaves com espécimes da fauna. Ou seja, áreas circulares definidas a partir do centro geométrico da maior pista de um aeródromo, com 20 km de raio, cujos uso e ocupação estão sujeitos a restrições especiais em função da natureza atrativa de fauna. Dessa forma, atividades que atraiam uma quantidade relevante de fauna no interior da ASA, ou que, como aterros sanitários, tenham tal potencial, comprometem a segurança operacional da aviação e não devem ser construídas nas imediações de aeródromos.

É muito complicado atender a todas as recomendações e algumas, como proximidade da demanda e distância mínima entre um aeródromo e áreas urbanas, são contraditórias. Por isso, o processo de escolha de um sítio aeroportuário consiste em selecionar uma opção que gere menos inconvenientes para o aeroporto, a comunidade e o meio ambiente.

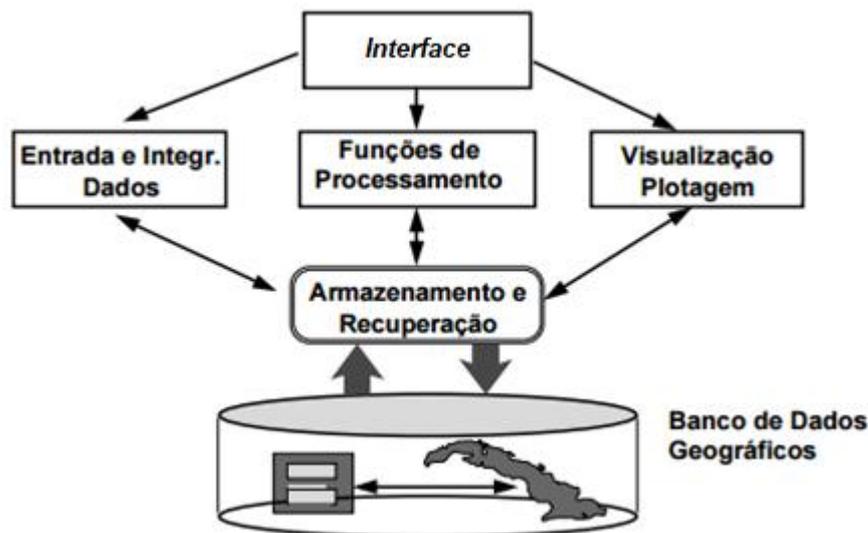
⁷ Superfícies que definem um volume de espaço aéreo no aeródromo e ao seu redor, que deve ser mantido livre de obstáculos, de modo a permitir que as operações das aeronaves sejam conduzidas de forma segura, evitando a interdição ou restrições às operações do aeródromo. (ANAC, 2015)

2.2 SISTEMA DE INFORMAÇÕES GEOGRÁFICAS

Segundo Câmara (1995), o termo “Sistemas de Informações Geográficas” (SIG) se refere a ferramentas que realizam o tratamento computacional de dados geográficos. De acordo com o autor, há três usos principais para um SIG: a elaboração de mapas, análises espaciais, e o seu uso como um banco de dados geográficos.

Câmara (1995) também afirma que a principal característica de um SIG é a capacidade de combinar e armazenar, em uma única base de dados, várias informações espaciais. Para isso, o SIG oferece mecanismos para manipulação, análise e plotagem desse conteúdo geocodificado⁸. A Figura 1 ilustra a composição de um SIG.

Figura 1: Esboço da composição básica de um SIG



Fonte: Câmara et al. (1996).

Esses usos e características refletem a versatilidade dessa tecnologia e a possível multidisciplinaridade de sua utilização.

⁸ Que recebeu coordenadas geográficas (latitude e longitude).

Definição obtida de: <https://doc.arcgis.com/pt-br/arcgis-online/reference/geocode.htm>, e <https://www.priberam.com/dlpo/geocodifica%C3%A7%C3%A3o>, ambos acessados em 02/06/2018.

2.2.1 DADOS GEOGRÁFICOS

De acordo com Câmara (1995), o principal elemento dos dados geográficos trabalhados em um sistema de informações geográficas é a dualidade da informação que eles contêm. Ao mesmo tempo que os dados geográficos possuem uma localização geográfica (expressa em coordenadas), eles também possuem atributos descritivos, comuns em bancos de dados convencionais.

Existem três conceitos distintos utilizados nesse trabalho: entidade geográfica, dado espacial e dado geográfico. Uma entidade geográfica é qualquer entidade do mundo real que possua características espaciais e se relacione com outras entidades geográficas (GATRELL, 1991). Dado espacial é qualquer tipo de dado que represente fenômenos com uma ou mais dimensões espaciais. Por fim, dados geográficos ou georeferenciados são dados espaciais cujas dimensões estão associadas à sua posição na superfície terrestre (CAMARA *et al.*, 1996).

Assim, uma entidade geográfica, como uma rodovia, é representada por dados espaciais em um sistema de informações geográficas. Uma vez que sejam atribuídas coordenadas a esses dados, eles passam a ser considerados dados geográficos.

Medeiros e Pires (1994) complementam Câmara (1995) ao atribuir uma terceira característica essencial aos dados geográficos: além das características espaciais (localização geográfica) e não-espaciais (atributos descritivos), os autores incluem características temporais (seu período de validade e suas variações ao longo do tempo).

2.2.2 MODELOS DE REPRESENTAÇÃO

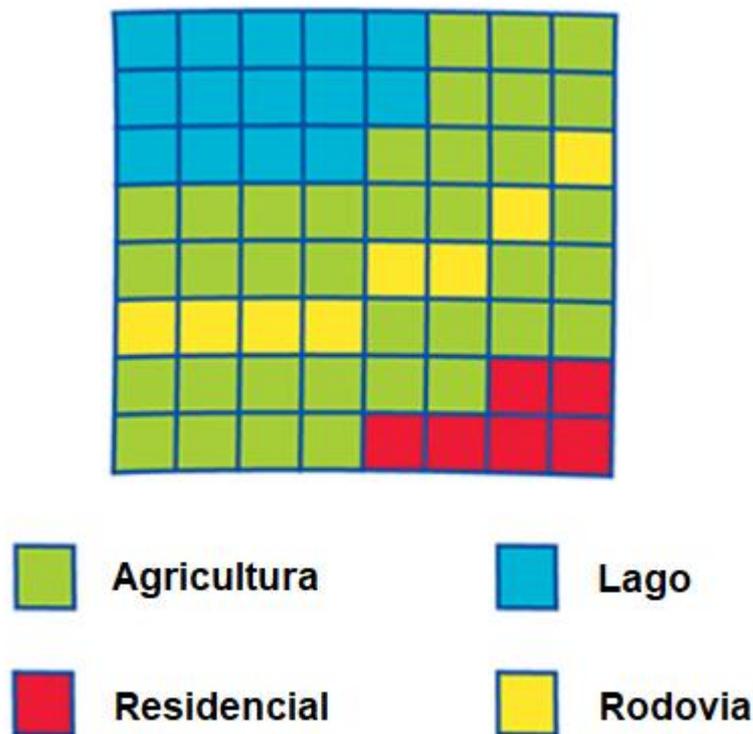
De acordo com Davis (2001) os dados espaciais em um SIG possuem dois formatos primários: matricial (*raster*) e vetorial (*vector*). O formato matricial utiliza uma estrutura de grade de células, enquanto o formato vetorial é mais similar a um mapa de linhas. O autor também afirma que cada formato de dados apresenta vantagens e desvantagens, de forma que ambos são necessários para muitos projetos com SIG.

Para o dicionário do suporte técnico da empresa ESRI⁹, *raster* é um modelo de dados espaciais que define o espaço como uma matriz de células do mesmo tamanho, organizada em linhas e colunas e composta de uma ou mais bandas. Cada célula dessa matriz possui um valor

⁹ <https://support.esri.com/en/other-resources/gis-dictionary/search/>, acessado em 17/06/2018.

e coordenadas de localização¹⁰. Ao contrário de estruturas vetoriais, que armazenam essas coordenadas explicitamente, em um *raster* as coordenadas de um ponto são definidas pela sua posição dentro da matriz. O dicionário ainda afirma que grupos de células com os mesmos valores representam a mesma feição geográfica. A Figura 2 ilustra uma matriz de representação *raster*, onde as células verdes correspondem a áreas agrícolas, as azuis a lagos, as vermelhas a áreas residenciais e as amarelas a uma rodovia.

Figura 2: ilustração de um modelo de representação matricial.



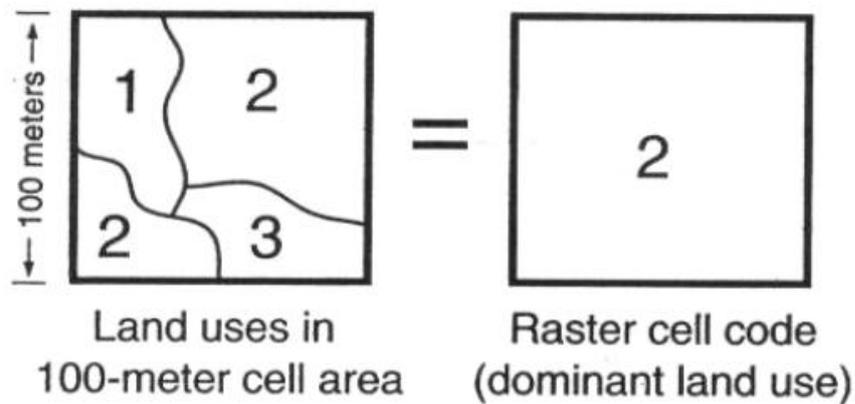
Fonte: Adaptado do dicionário do suporte técnico da empresa ESRI⁹.

De acordo com essa definição, Davis (2001) afirma que a célula (também chamada de *pixel*) é a unidade mínima de mapeamento, o que significa que ela é o menor tamanho com o qual qualquer “feição” de uma paisagem pode ser representada em um modelo matricial. Assim, todas as feições na área de uma célula são reduzidas a uma única identificação de célula. Segundo o autor, isso significa que toda a geografia de uma área coberta por uma célula é acumulada e combinada nessa única identificação, generalizando a paisagem e suas feições.

¹⁰ Essas coordenadas de localização podem ser coordenadas geográficas (latitude e longitude) ou planas (x, y).

A cada célula de uma matriz do formato *raster* é atribuído um valor único de identificação, normalmente um número ou um rótulo textual. A Figura 3 ilustra uma área de 100 metros quadrados com quatro zonas, contendo três tipos diferentes de uso da terra. Como cada célula só pode receber um valor, esta recebeu o valor dominante (2).

Figura 3: Área coberta por uma célula (esquerda) e Identificação da célula (direita).

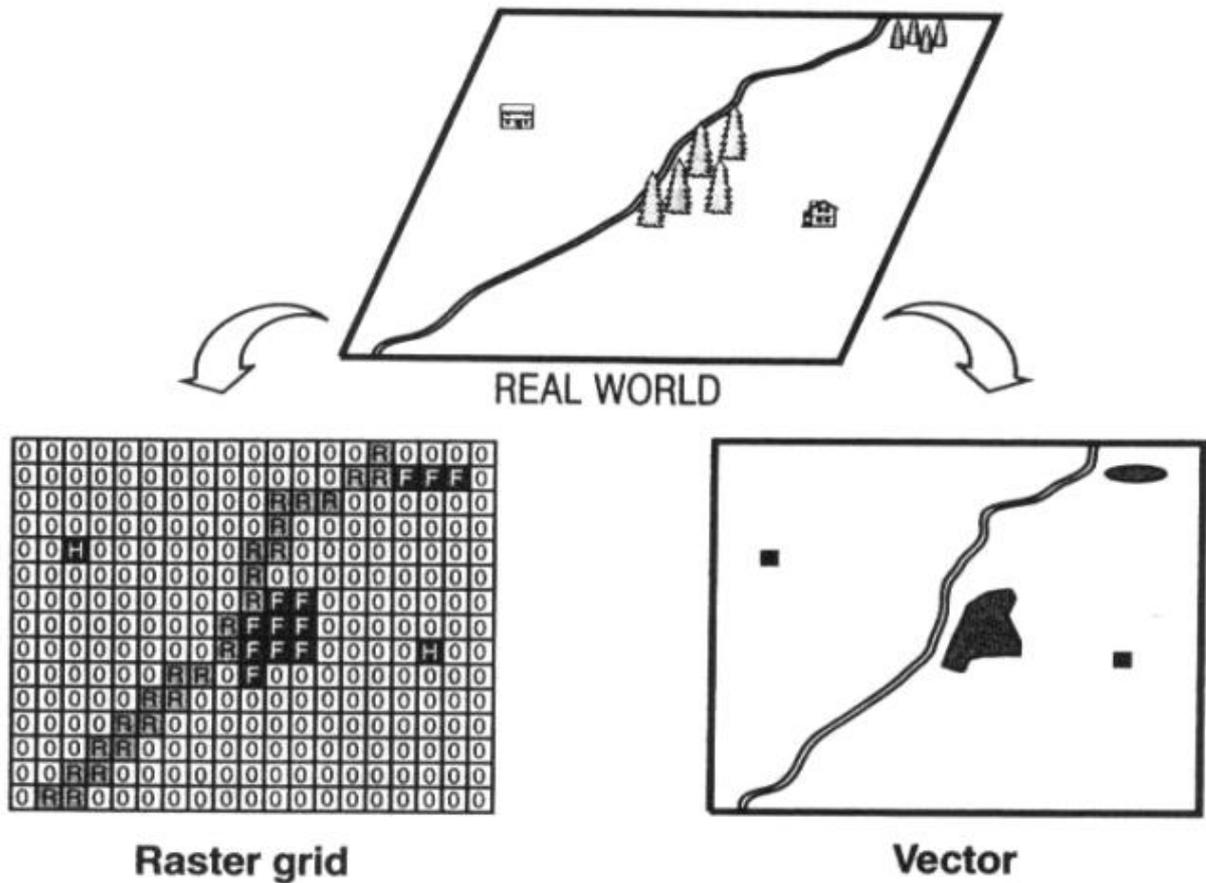


Fonte: Davis (2001).

O tamanho da célula (ou *pixel*) é, portanto, determinante para a qualidade da imagem. Quanto menor o tamanho da célula, mais precisa será a representação e o armazenamento de informações. Da mesma forma, quanto maior o tamanho de célula, menor a resolução da obtida.

O modelo vetorial, por outro lado, retrata a geometria de entidades geográficas por meio de pontos, linhas e polígonos. Um ponto é definido por um par de coordenadas, uma linha por uma sequência de pontos e um polígono por uma sequência de linhas cujas coordenadas inicial e final são idênticas. Segundo Davis (2001), as feições no formato vetorial não são quebradas em células ou em fragmentos, mas são contínuas do início ao fim. Isso faz com que os dados vetoriais sejam muito mais acurados do que os dados matriciais. A Figura 4 apresenta uma área do mundo real e sua versão nos formatos *raster* à esquerda e vetorial à direita. Cada letra nas células da matriz *raster* é o código de uma das entidades geográficas do mundo real (R – rio, F – floresta, H – casa). As células que não contém feições recebem o código 0.

Figura 4: Formatos *raster* (esquerda) e vetorial (direita) para uma mesma área.



Fonte: Davis (2001)

Como pode ser observado na Figura 4, as células da matriz não mantêm corretos o tamanho, a forma ou a localização, para feições individuais. O rio, por exemplo, é mais estreito do que uma célula. Contudo, somente uma célula inteira pode ser codificada como rio, assim, o rio aparece mais largo e menos sinuoso do que ele realmente é. (DAVIS, 2001)

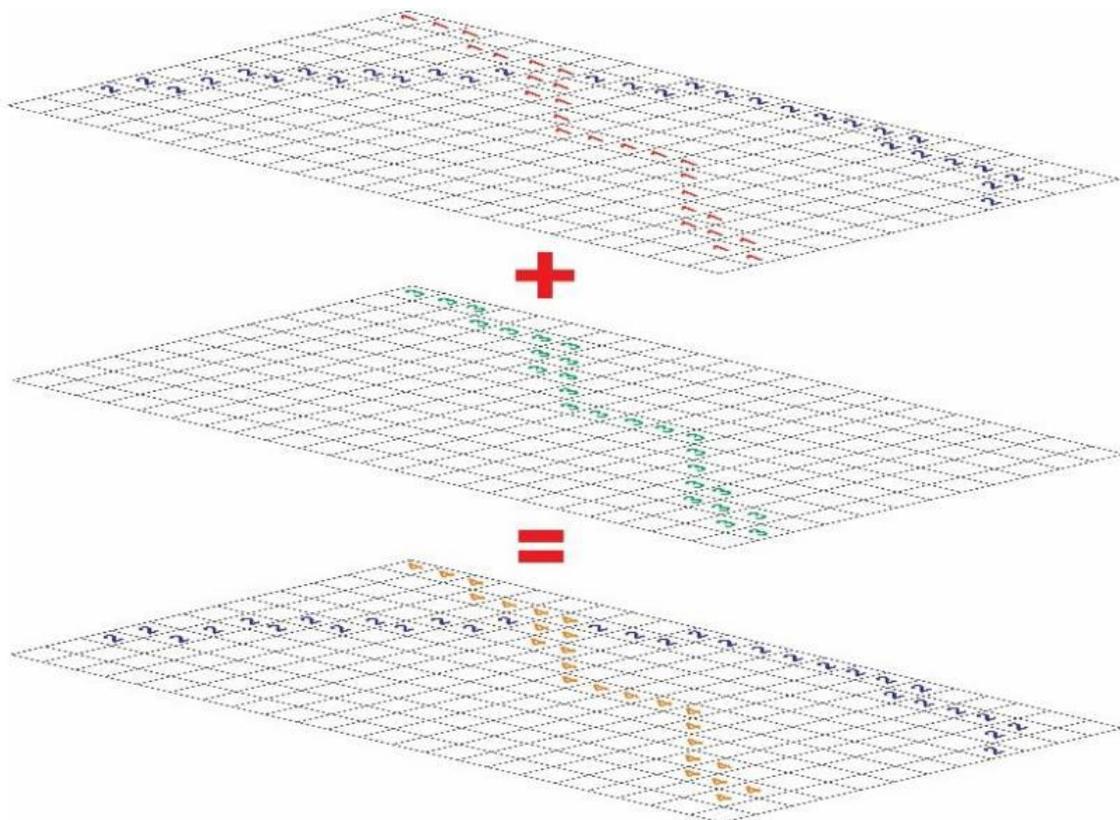
Além de representar entidades geográficas de formas diferentes, Os formatos matricial e vetorial também são obtidos e codificados de formas diferentes, destinando-se a usos distintos. Portanto, embora normalmente os dados geográficos possam ser representados de ambas as formas, alguns deles costumam se adequar melhor ao formato matricial e outros ao vetorial. Para modelos digitais de terreno e imagens de satélite, por exemplo, o formato matricial é mais adequado, enquanto que para rodovias, divisões político-administrativas e cursos de rios o formato vetorial é melhor.

2.2.3 ÁLGEBRA DE MAPAS

Segundo o dicionário do suporte técnico da empresa ESRI¹¹, a álgebra de mapas é um processo de combinação de mapas *raster* através de operações matemáticas e funções analíticas.

Assim, mapas temáticos de uma mesma área podem ser, por exemplo, adicionados, subtraídos ou multiplicados, produzindo novos mapas como resultado dessas operações. A Figura 5 ilustra uma operação de adição, em que os valores numéricos de cada pixel de um mapa são adicionados aos valores dos *pixels* equivalentes (na mesma posição) de outro mapa.

Figura 5: Representação de uma operação de adição com álgebra de mapas.



Fonte: Olaya (2011, adaptado por Schmitt, 2016)

¹¹ <https://support.esri.com/en/other-resources/gis-dictionary/search/>, acessado em 06/06/2018.

2.3 ANÁLISE MULTICRITÉRIO

Miranda (2010) afirma que a Análise Multicritério (AMC) é o nome designado a um conjunto de métodos de manipulação de múltiplos critérios, tanto quantitativos quanto qualitativos. Segundo o autor, há diversos métodos de AMC distintos, elaborados para diferentes propósitos e em diferentes contextos. Desses métodos, um dos que pode ser melhor integrado a um SIG é chamado de Análise Hierárquica de Processos.

2.3.1 ANÁLISE HIERÁRQUICA DE PROCESSOS

Segundo consta no documento “The Analytic Hierarchy Process”¹² publicado pelo Departamento de Engenharia da Informação e Ciências Matemáticas da Universidade de Siena, o método de Análise Hierárquica de Processos (AHP) foi desenvolvido por Thomas Saaty (1980). Essa técnica é considerada uma ferramenta eficiente para tomada de decisões complexas, por reduzi-las a pares de comparações e abranger tanto critérios objetivos quanto subjetivos. Além disso, a AHP incorpora uma checagem da consistência dos valores atribuídos pelo usuário durante a hierarquização dos critérios utilizados. Esse documento também descreve os passos necessários para a realização dessa análise, descritos de forma adaptada a seguir:

Normalmente, são definidos na AHP o objetivo geral do estudo, os critérios utilizados e diferentes alternativas ou cenários.

Ao aplicar a AHP foram seguidas as seguintes etapas propostas por Saaty (1980):

1. Identificar o objetivo e os critérios a serem utilizados;
2. Atribuir pesos relativos entre esses critérios, em uma matriz de comparação;
3. Calcular o vetor com os pesos finais dos critérios;
4. Verificar a consistência dos resultados obtidos.

Para se calcular o vetor w com o peso dos diferentes critérios, é preciso criar uma matriz quadrada A $n \times n$, em que n é o número de critérios a serem trabalhados. Esses critérios são então analisados dois a dois, atribuindo a eles valores que variam de 1 a 5, dependendo de sua importância em relação ao outro critério a que está sendo comparado. Assim, cada célula a_{ij} da matriz A representa a importância do critério i em relação ao critério j . Portanto, se

¹² http://www.dii.unisi.it/~mocenni/Note_AHP.pdf, acessado em 06/10/2018.

$a_{ij} = 1$, ambos os critérios comparados possuem a mesma importância. Já se $a_{ij} < 1$, o critério i será x vezes menos importante do que o critério j , enquanto que se $a_{ij} > 1$ o critério i será x vezes mais importante do que o critério j , sendo x o valor atribuído variando de 1 a 9. Para que a construção da matriz A seja consistente, é essencial que $a_{ij} \times a_{ji} = 1$ e $a_{jj} = 1$, para todo j .

Essa matriz A é denominada de matriz de comparação dos critérios e os valores de importância relativa atribuídos aos critérios variam em uma escala de 1 a 5. Eles estão representados na Tabela 1.

Tabela 1: Valores de importância relativa dos critérios utilizados na AHP.

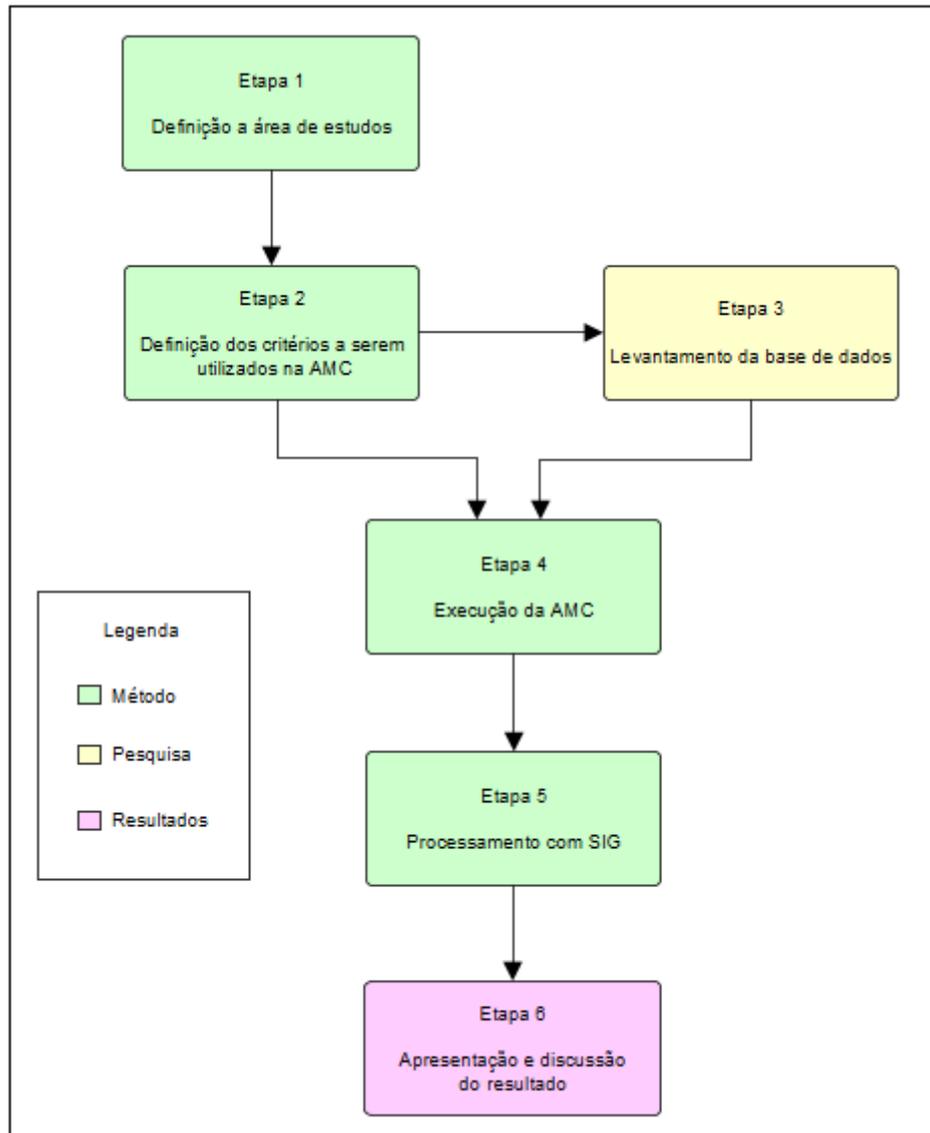
Valores de a_{ij}	Interpretação
1	O critério i é tão importante quanto o critério j
2	O critério i é um pouco mais importante do que o critério j
3	O critério i é mais importante do que o critério j
4	O critério i é bem mais importante do que o critério j
5	O critério i é indiscutivelmente mais importante do que o critério j

Fonte: Adaptado de http://www.dii.unisi.it/~mocenni/Note_AHP.pdf, acessado em 10/05/2018.

3. MÉTODO

O método utilizado nesse trabalho é organizado em etapas, conforme o fluxograma ilustrado na Figura 6. Nesse trabalho, foi adotada a premissa que se deseja construir um aeroporto com uma pista de pouso e decolagem de quatro quilômetros de extensão.

Figura 6: Fluxograma representando o método deste trabalho.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A definição da área de estudos é uma das premissas para a execução das demais etapas. A partir dela, da revisão bibliográfica e da definição dos critérios, foi realizado o processo de levantamento da base de dados. Nessa etapa, foram consultados os principais

órgãos e instituições geradores e disponibilizadores de bases de dados secundários (adaptado de Lopes, 2015). Com a determinação das bases de dados e da área de estudo, é executada a análise multicritério. Uma vez obtidos os pesos de cada um desses critérios, eles são atribuídos às camadas de dados geográficos com auxílio de um SIG. Nesta etapa, é gerado o resultado final deste trabalho: um mapa de adequabilidade para auxiliar na escolha de sítio aeroportuário considerando todos os critérios previamente selecionados.

As etapas de um a cinco estão apresentadas no tópicos subseqüentes, assim como os resultados parciais obtidos durante a aplicação desse método.

3.1 DEFINIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO – Etapa 1

Apesar das microrregiões de Joinville e de Blumenau, em Santa Catarina, serem o maior polo industrial do Estado¹³ e representarem aproximadamente um terço da população estadual, elas dispõem de infraestrutura aeroportuária insuficiente. A microrregião de Blumenau não possui nenhum aeroporto próprio com operações regulares e a de Joinville possui apenas um aeroporto, com baixa frequência de voos e que não comporta algumas das maiores aeronaves para transporte de passageiros e carga, como o Airbus A330 ou outros da mesma categoria. Por isso, parte da demanda da área de estudo, tanto pelo transporte de passageiros quanto pelo transporte de cargas, é atendida pelo aeroporto de Navegantes. No caso de passageiros, parte das viagens também ocorre nos aeroportos de Curitiba e Florianópolis.

Desde 2009 foram elaborados diferentes projetos de expansão para os aeroportos de Joinville, Blumenau e Navegantes, mas nenhum deles foi concretizado. Por este motivo, essas duas microrregiões foram escolhidas como a área de estudo deste trabalho.

Quanto às características físicas¹⁴, os relevos predominantes nessas microrregiões são a planície costeira, as planícies fluviais e as serras litorâneas. As planícies estão localizadas próximas ao litoral e no vale do rio Itajaí, com vários morros e colinas distribuídos de forma irregular ao longo de toda a sua extensão. A vegetação é variada, incluindo mangues, restingas, praias, dunas e Mata Atlântica. As serras litorâneas ultrapassam os 1500 metros de altitude e são formadas pela Serra do Mar, com Mata Atlântica como vegetação

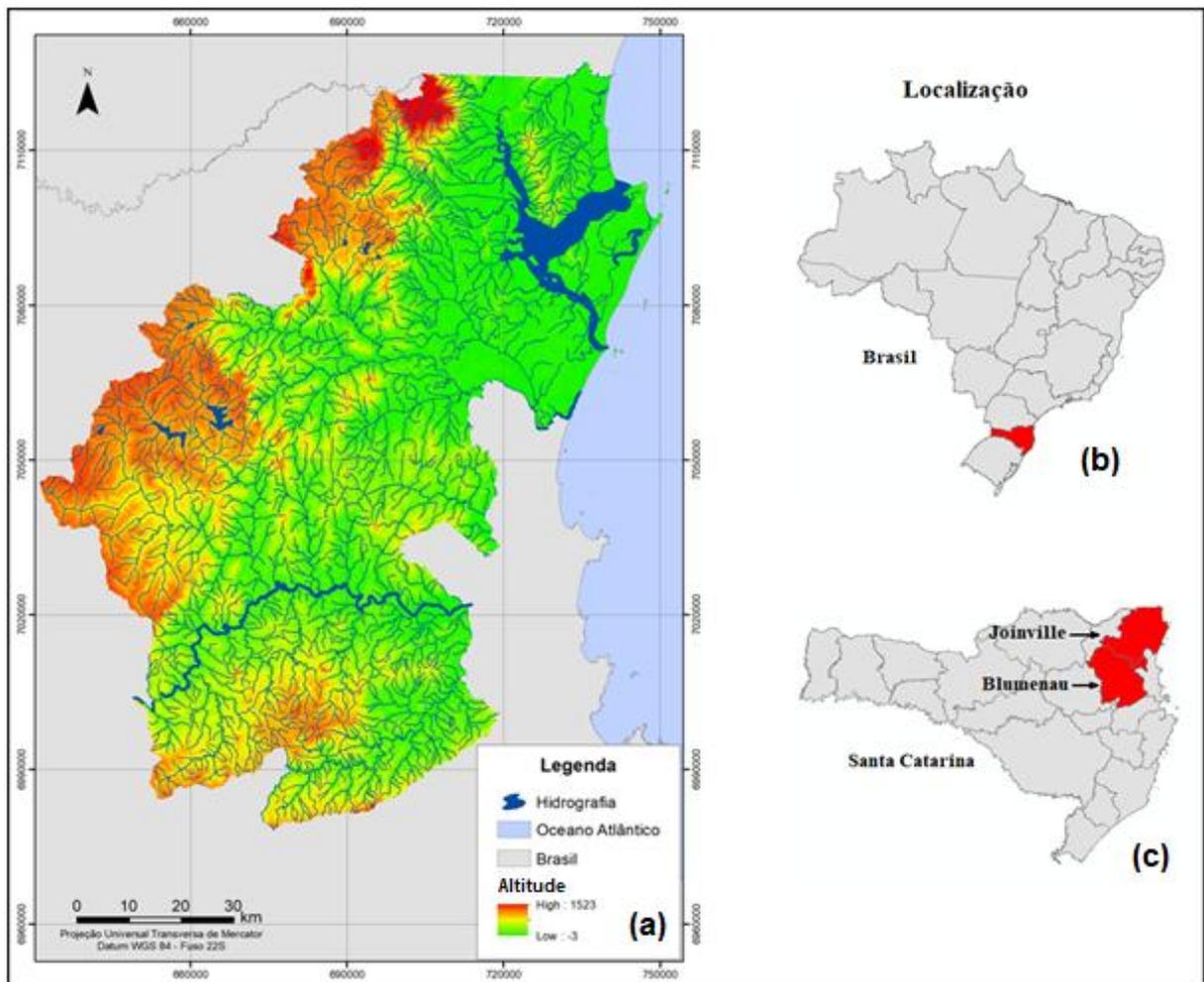
¹³ As microrregiões de Joinville e Blumenau são respectivamente pólos eletro-metal-mecânico e têxtil. Elas também possuem várias empresas de tecnologia e desenvolvimento de *softwares*. (FIESC, 2010)

¹⁴ http://professordegeografiaatual.blogspot.com/2011/04/geografia-de-santa-catarina-aspectos_6122.html, acessado em 17/06/2018.

predominante. O clima subtropical úmido, predominante em SC, proporciona temperaturas que variam em uma média entre 13 e 25° C, com chuvas distribuídas durante todo o ano¹⁵.

As Figuras 7 e 8 indicam a localização da área de estudo. Em (b) e (c), na Figura 7, estão a localização de Santa Catarina no Brasil e a localização das microrregiões de Joinville e Blumenau em Santa Catarina. Em (a) está um mapa de relevo, onde as áreas em verde correspondem às planícies e as em vermelho à Serra do Mar. A Figura 8 é uma vista de perfil, do oceano para o continente, e ilustra o relevo tridimensionalizado.

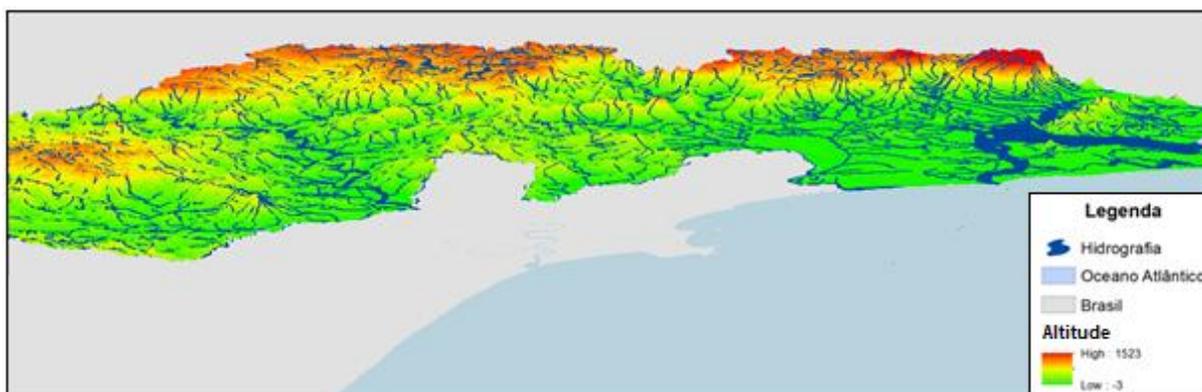
Figura 7: Área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

¹⁵ <http://www.sc.gov.br/conhecasc/geografia>, acessado em 17/06/2018.

Figura 8: Vista de perfil da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

3.2 DEFINIÇÃO DOS CRITÉRIOS – Etapa 2

A partir da proposta de aplicar o método de AHP integrada a um SIG para a escolha de sítio aeroportuário nas microrregiões de Joinville e Blumenau, identificou-se a necessidade do levantamento das características mais relevantes nesse processo. Para isso, os critérios utilizados foram escolhidos de acordo com as normas brasileiras e as recomendações de Ashford, Mumayiz e Wright (2011), listadas na revisão bibliográfica. Devido a restrições de tempo e dados, apenas uma parte das recomendações foi seguida para a definição dos critérios de escolha de sítio aeroportuário.

Os critérios selecionados foram separados em duas categorias: restritivos e de possibilidade. Os critérios restritivos representam áreas sobre as quais não é admitida a construção de aeródromos em razão de características legais e/ou técnicas. Eles são compostos por terras indígenas, unidades de conservação e cursos d'água. Os critérios de possibilidade representam áreas com diferentes valores de atratividade para a construção de aeroportos. Elas são compostas por declividades do terreno e por localizações de rodovias, áreas urbanas e outros aeródromos. Apesar dessa classificação, os critérios de possibilidade também foram utilizados para representar áreas sobre as quais não é admitida a construção de aeródromos, conforme explicado no capítulo de aplicação do método.

A separação dos critérios nessas duas categorias está justificada na etapa três do método.

3.3 LEVANTAMENTO DA BASE DE DADOS – Etapa 3

Nessa etapa, foram levantados dados espaciais e geográficos para os critérios definidos na segunda etapa. Nos itens subsequentes estão apresentadas as características dos dados e as fontes de onde foram obtidos.

a) Terras indígenas (critério restritivo).

Sobre terras indígenas, o artigo 231 da Constituição da República Federativa do Brasil de 1988 estabelece que:

§ 1º São terras tradicionalmente ocupadas pelos índios as por eles habitadas em caráter permanente, as utilizadas para suas atividades produtivas, as imprescindíveis à preservação dos recursos ambientais necessários a seu bem-estar e as necessárias a sua reprodução física e cultural, segundo seus usos, costumes e tradições.

§ 2º As terras tradicionalmente ocupadas pelos índios destinam-se a sua posse permanente, cabendo-lhes o usufruto exclusivo das riquezas do solo, dos rios e dos lagos nelas existentes.

(...)

§ 4º As terras de que trata este artigo são inalienáveis e indisponíveis, e os direitos sobre elas, imprescritíveis. (BRASIL, 1988)

O Estatuto do Índio, Lei Nº 6001 de 1973, complementa a constituição ao definir que:

Art. 20. Em caráter excepcional e por qualquer dos motivos adiante enumerados, poderá a União intervir, se não houver solução alternativa, em área indígena, determinada a providência por decreto do Presidente da República.

1º A intervenção poderá ser decretada:

(...)

d) para a realização de obras públicas que interessem ao desenvolvimento nacional;

(...)

3º Somente caberá a remoção de grupo tribal quando de todo impossível ou desaconselhável a sua permanência na área sob intervenção, destinando-se à comunidade indígena removida área equivalente à anterior, inclusive quanto às condições ecológicas.

4º A comunidade indígena removida será integralmente ressarcida dos prejuízos decorrentes da remoção. (BRASIL, 1973)

Pelo disposto na Constituição Brasileira de 1988 e no Estatuto do Índio, é vedada a utilização de terras indígenas, salvo em caráter excepcional, quando a realização de uma obra pública interessar ao desenvolvimento nacional. Mesmo nesse caso, ainda é preciso remover a comunidade indígena para uma área equivalente à anterior e ressarcí-la de quaisquer prejuízos. Por se tratar de um processo extremamente complicado, as áreas indígenas foram consideradas critérios restritivos.

Os dados de áreas indígenas foram obtidos em formato *shapefile*¹⁶ do *site* da Fundação Nacional do Índio¹⁷ (FUNAI).

b) Unidades de conservação (critério restritivo).

Sobre unidades de conservação, a Lei Nº 9.985 de 2000 define que:

Art. 3º O Sistema Nacional de Unidades de Conservação da Natureza - SNUC é constituído pelo conjunto das unidades de conservação federais, estaduais e municipais, de acordo com o disposto nesta Lei.

(...)

Art. 7º As unidades de conservação integrantes do SNUC dividem-se em dois grupos, com características específicas:

I - Unidades de Proteção Integral;

II - Unidades de Uso Sustentável.

¹⁶ *Shapefile* é um formato vetorial de armazenamento de localização, forma e atributos de feições geográficas. Definição obtida do dicionário do suporte técnico da empresa ESRI: <https://support.esri.com/en/other-resources/gis-dictionary/search/>, acessado em 18/06/2018.

¹⁷ <http://www.funai.gov.br/index.php/shape>, acessado em 29/04/2018.

§ 1o O objetivo básico das Unidades de Proteção Integral é preservar a natureza, sendo admitido apenas o uso indireto dos seus recursos naturais, com exceção dos casos previstos nesta Lei.

§ 2o O objetivo básico das Unidades de Uso Sustentável é compatibilizar a conservação da natureza com o uso sustentável de parcela dos seus recursos naturais. (BRASIL, 2000)

Conforme disposto na introdução e na revisão bibliográfica desse trabalho, aeroportos geram impactos ambientais negativos e não são compatíveis com os usos das terras de unidades de conservação estipulados pela Lei Nº 9.985 de 2000. Assim, fica definido que as unidades de conservação são critérios restritivos.

Os dados de unidades de conservação foram obtidos em formato *shapefile* do *site* do Ministério do Meio Ambiente¹⁸ (MMA).

c) Cursos d'água (critério restritivo).

Sobre cursos d'água, a Lei Nº 12.651 de 2012 define:

Art. 1º Esta Lei estabelece normas gerais sobre a proteção da vegetação, áreas de Preservação Permanente e as áreas de Reserva Legal;

(...)

Área de Preservação Permanente (APP): área protegida, coberta ou não por vegetação nativa, com a função ambiental de preservar os recursos hídricos, a paisagem, a estabilidade geológica e a biodiversidade, facilitar o fluxo gênico de fauna e flora, proteger o solo e assegurar o bem-estar das populações humanas;

(...)

Art. 4º Considera-se Área de Preservação Permanente, em zonas rurais ou urbanas, para os efeitos desta Lei:

I - as faixas marginais de qualquer curso d'água natural perene e intermitente, excluídos os efêmeros, desde a borda da calha do leito regular, em largura mínima de:

¹⁸ <http://www.mma.gov.br/areas-protegidas/cadastro-nacionalde-ucs/dados-georreferenciados>, acessado em 29/04/2018.

- a) 30 (trinta) metros, para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;
- b) 50 (cinquenta) metros, para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;
- c) 100 (cem) metros, para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;
- d) 200 (duzentos) metros, para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;
- e) 500 (quinhentos) metros, para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros; (BRASIL, 2012)

Considerando os impactos ambientais negativos gerados por aeroportos e pela necessidade de que a área de um terminal aeroportuário não apresente obstruções nas rotas das aeronaves, tais como árvores ou antenas, as APPs foram consideradas critérios restritivos. Além disso, Kazda e Caves (2015) ainda estabelecem que o tipo e a composição das árvores em um aeroporto devem ser tais que desencoragem a presença de pássaros.

Os dados de hidrografia referentes aos cursos d'água foram obtidos em formato *shapefile* da Base Cartográfica Contínua do Brasil¹⁹. Esses dados estavam separados em dois arquivos distintos. Um para cursos d'água estreitos e um para cursos d'água largos.

Visando respeitar as APPs impostas pela Lei Nº 12.651 de 2012, foram adotadas faixas marginais de 50 metros para os cursos d'água estreitos e de 200 metros para cursos d'água largos. Essas faixas marginais foram consideradas como parte dos cursos d'água ao se trabalhar os critérios restritivos no SIG.

d) Declividade (critério de possibilidade)

Segundo Ashford, Mumayiz e Wright (2011), aeroportos precisam de grandes extensões de terra relativamente plana para operar. Pequenas alterações na inclinação das pistas ou elevações que interfiram na rota de pouso e decolagem podem afetar o desempenho

¹⁹ ftp://geofpt.ibge.gov.br/cartas_e_mapas/bases_cartograficas_continuas/bcim/versao2016/shapefile/, acessado em 30/04/2018.

das aeronaves. Assim, quanto mais plana for uma área, mais adequada e atrativa ele será para a implantação de um novo aeroporto.

Os valores de declividade do terreno foram obtidos de dados altimétricos. Os arquivos contendo esses dados foram adquiridos em formato *raster* no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil²⁰, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), que utiliza dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) reamostrados resultando em pixels de 30 metros quadrados.

e) Rodovias (critério de possibilidade)

As rodovias foram consideradas como possíveis acessos terrestres ao aeroporto, tanto para o transporte individual como para a oferta de transporte público e coletivo. Dessa forma, quanto mais próximo o novo aeroporto estiver de uma área com rodovias, mais fácil será o acesso por terra e menores os custos para sua implantação. Ou seja, áreas mais próximas de rodovias são mais adequadas para a implantação de um novo sítio aeroportuário.

Os dados do sistema rodoviário foram obtidos em arquivos *shapefile* que continham as rodovias federais e estaduais. Eles foram adquiridos no Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil²¹. Outros arquivos com dados rodoviários podem ser obtidos pelos sites do Departamento Estadual de Infraestrutura²² (DEINFRA) e do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes²³ (DNIT).

f) Áreas urbanas (critério de possibilidade)

O IBGE (2013) define em seu Manual Técnico de Uso da Terra áreas urbanas como:

Áreas antrópicas não agrícolas (1)

A esta nomenclatura estão associados todos os tipos de uso da terra de natureza não agrícola, florestal ou água, tais como áreas urbanizadas, industriais, comerciais, redes de comunicação e áreas de extração mineral.

Áreas urbanizadas (1.1): Como situação urbana foram consideradas as áreas correspondentes às cidades (sedes municipais), às vilas (sedes

²⁰ <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>, acessado em 29/04/2018.

²¹ <http://www.dsr.inpe.br/topodata/acesso.php>, acessado em 29/04/2018.

²² http://www.deinfra.sc.gov.br/jsp/informacoes_sociedade/downloadMapas.jsp, acessado em 10/04/2018.

²³ <http://www.dnit.gov.br/mapasmultimodais/shapefiles>, acessado em 10/04/2018.

distritais) e às áreas urbanas isoladas conforme classificação do IBGE. Compreendem áreas de uso intensivo, estruturadas por edificações e sistema viário, onde predominam as superfícies artificiais não agrícolas. Estão incluídas nesta categoria as metrópoles, cidades, vilas, áreas de rodovias, serviços e transporte, energia, comunicações e terrenos associados, áreas ocupadas por indústrias, complexos industriais e comerciais e instituições que podem em alguns casos encontrar-se isolados das áreas urbanas. As áreas urbanizadas podem ser contínuas, onde as áreas não lineares de vegetação são excepcionais, ou descontínuas, onde as áreas vegetadas ocupam superfícies mais significativas. (CENSO DEMOGRÁFICO 2010, 2011). (IBGE, 2013)

Assim como destacado por Ashford, Mumayiz e Wright (2011), é preciso considerar a distância de um aeroporto à demanda. Neste trabalho, cidades e complexos industriais foram considerados as principais áreas com demanda por serviços aéros. Dessa forma, quanto mais próxima estiver uma área de uma área urbanizada, mais atrativa ela será para a construção de um novo aeroporto. Nas próximas etapas deste método, as áreas urbanas são chamadas de “urbanização”.

Os dados de áreas urbanas foram obtidos em arquivos *shapefile* de setores censitários do site do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística²⁴ (IBGE). Nesses arquivos, os setores censitários estão classificados em “urbanos” e “rurais”, o que torna possível excluir os setores rurais e permanecer apenas com setores pertencentes a áreas urbanas.

Do mesmo endereço (IBGE), foram obtidos arquivos com dados das microrregiões brasileiras. Eles foram utilizados para a delimitação da área de estudos no ambiente SIG.

g) Aeródromos (critério de possibilidade)

Assim como definido no capítulo de revisão bibliográfica, aeródromos são destinados ao pouso, decolagem e movimentação de aeronaves. Horonjeff *et al.* (2010) dispõem que a influência de outros aeroportos no espaço aéreo deve ser considerada ao se escolher uma área para implantação de um aeroporto. Portanto, foi considerado que quanto mais longe uma área estiver de um aeródromo, mais atrativa ela será para a implantação de um novo aeroporto.

²⁴ <https://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais.html>, acessado em 29/04/2018.

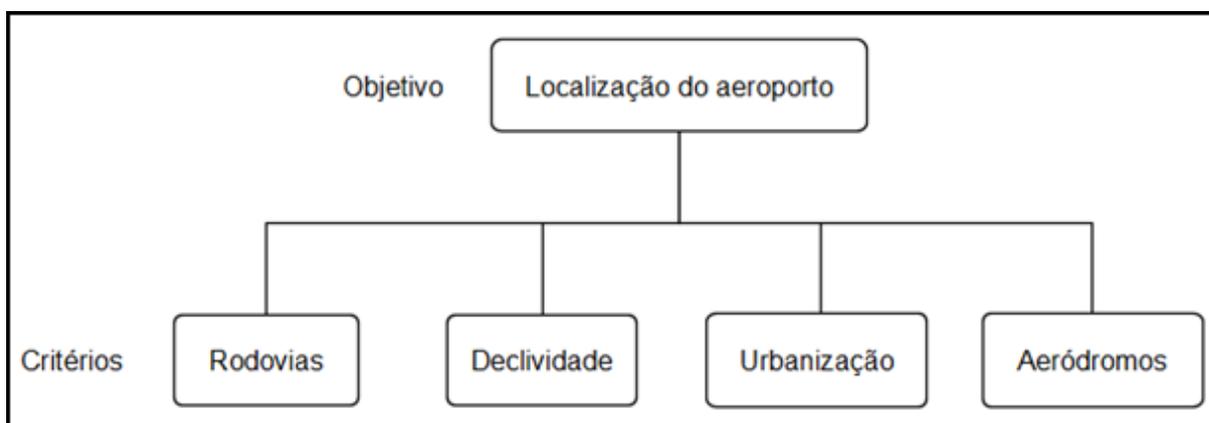
Há quatro aeródromos na área de estudo: os aeroportos de Joinville e Blumenau, e os aeródromos de São Francisco do Sul (SFS) e Brusque. Todos foram considerados ao se utilizar esse critério.

Os dados dos aeródromos foram obtidos em formato *shapefile* da Base de Dados Georreferenciados (PNLT, 2010), no *site* do Ministério dos Transportes, Portos e Aviação Civil²⁵.

3.4 EXECUÇÃO DA AMC – Etapa 4

Nessa etapa, foi realizada a AMC com os critérios de possibilidade. A Figura 9 apresenta a hierarquização adotada na análise. O fluxograma da Figura 10 mostra os passos seguidos durante a aplicação do método de AHP, de acordo com a revisão bibliográfica desse trabalho (item 2.3.1).

Figura 9: Hierarquização da AHP – Objetivo e critérios.

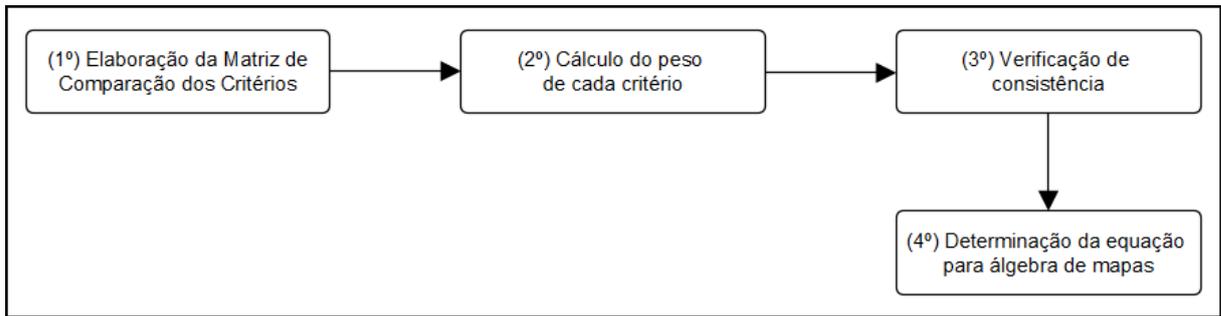


Fonte: Elaborado pelo autor.

O método proposto por Saaty (1980) prevê a hierarquização do processo em objetivo geral, critérios e alternativas. Neste trabalho, não foi considerada nenhuma alternativa. Isso simplificou a AHP e resultou em uma estrutura hierárquica apenas com objetivo geral e critérios (neste caso, os de possibilidade).

²⁵ <http://www.transportes.gov.br/conteudo/2822-base-de-dados-georreferenciados-pnlt-2010.html>, acessado em 29/04/2018.

Figura 10: Fluxograma de aplicação da AHP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

(1º) Elaboração da Matriz de Comparação dos Critérios

Neste passo, foi montada a Matriz de Comparação dos Critérios (Tabela 2) com os critérios de possibilidade. Suas células foram preenchidas com valores variando de um a cinco, conforme a Tabela 1 (pág. 16).

Tabela 2: Matriz de comparação dos critérios.

	Rodovias	Declividade	Urbanização	Aeródromos
Rodovias	1	1/2	1/3	1/5
Declividade	2	1	1/2	1/4
Urbanização	3	2	1	1/4
Aeródromos	5	4	4	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Assim, foi atribuída a importância de cada critério em relação aos demais. Por exemplo: o aeroporto ser construído em áreas de menor declividade é duas vezes mais importante do que ser construído próximo a rodovias. Da mesma forma, ser construído mais longe de um outro aeródromo já existente é quatro vezes mais importante do que ser construído próximo a áreas urbanas. A diagonal principal da matriz possui sempre o valor um, porque se refere à comparação do mesmo critério.

(2º) Cálculo do peso de cada critério

Uma vez que a matriz de comparação dos critérios esteja pronta, é preciso determinar a matriz de comparação dos critérios normalizada A_{norm} . Para isso, divide-se o valor de cada célula pela soma dos valores da coluna a qual ela pertence. A matriz A_{norm} está correta se a soma dos valores de cada uma de suas colunas for igual a um. Como mostra a Equação 1, em termos matemáticos,

$$a_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}} \quad (1)$$

Por fim, o vetor de pesos dos critérios w é determinado ao se somar os valores das linhas da matriz A_{norm} e dividi-los pelo número de critérios (ou de colunas) existentes. A soma dos valores desse vetor w deve ser igual a um. Matematicamente, como apresentado na Equação 2,

$$w_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{n} \quad (2)$$

(3º) Verificação de consistência

Depois que os pesos de cada critério foram identificados, é preciso verificar a consistência desses resultados. Para isso, é preciso multiplicar a matriz A pelo vetor w , obtendo-se assim o auto vetor principal, w_s , como mostrado na Equação 3.

$$w_s = A \times w \quad (3)$$

Em seguida, é calculado um vetor de consistência w_c . Para isso, basta dividir os valores do vetor w_s pelos de w , como apresentado na Equação 4.

$$w_c = \frac{w_s}{w} \quad (4)$$

Isso permite que seja encontrado o máximo auto valor $\lambda_{m\acute{a}x}$ ao se dividir o somatório dos elementos do vetor w_c pelos número de elementos somados, conforme a Equação 5.

$$\lambda_{m\acute{a}x} = \frac{\sum_{i=1}^n w_c}{n} \quad (5)$$

Na sequência, é calculado o índice de consistência CI pela Equação 6.

$$CI = \frac{\lambda_{m\acute{a}x} - n}{n - 1} \quad (6)$$

O valor de CI é usado para calcular a razão de consistência CR, como apresentado na Equação 7.

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (7)$$

Onde RI é o índice randômico de consistência, obtido da Tabela 3, dependendo do número de critérios utilizados na AHP.

Tabela 3: Relação entre o número de critérios utilizados e o valor de RI.

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,51

Fonte: http://www.dii.unisi.it/~mocenni/Note_AHP.pdf, acessado em 10/05/2018.

Finalmente, para que o processo seja consistente, é necessário que o valor de CR seja inferior ao apresentado na Tabela 4, dependendo do número de critérios utilizados.

Tabela 4: Valores de comparação da CR.

nº de critérios	CR
3	< 0,05
4	< 0,09
> 4	< 0,10

Fonte: Gomes; Araya; Carignano (2004, *apud* Paiva, 2008).

(4º) Determinação da equação para álgebra de mapas

Depois de verificada a consistência dos pesos, eles foram utilizados para a determinação de uma equação que combine todos os critérios de possibilidade, conforme a Equação 8:

$$Combinação = P1 \times C1 + P2 \times C2 + P3 \times C3 + P4 \times C4 \quad (8)$$

Onde:

Pi = Peso do critério de possibilidade “i”; e

Ci = Critério de possibilidade “i”.

3.5 PROCESSAMENTO COM SIG – Etapa 5

A maior parte da aplicação do método desse trabalho consistiu no processamento de dados espaciais ou geográficos em um ambiente SIG. Durante esse processo, foi adotado um tamanho de célula de dez metros quadrados para operações com mapas *raster*.

Uma vez que os arquivos de dados foram importados para o programa, o primeiro passo realizado foi georreferenciá-los, reprojeto-os ou atribuindo um sistema de coordenadas comum a todos eles. Nesse caso, o sistema utilizado foi a projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), *Datum* WGS 84, Fuso 22S, já utilizada nos dados de altimetria.

Com os dados geográficos inseridos no mesmo sistema de coordenadas, o arquivo de microrregiões foi utilizado para recortar os demais. Arquivos cujos dados abrangiam todo o Brasil foram reduzidos e passaram a ter dados apenas da área de estudo.

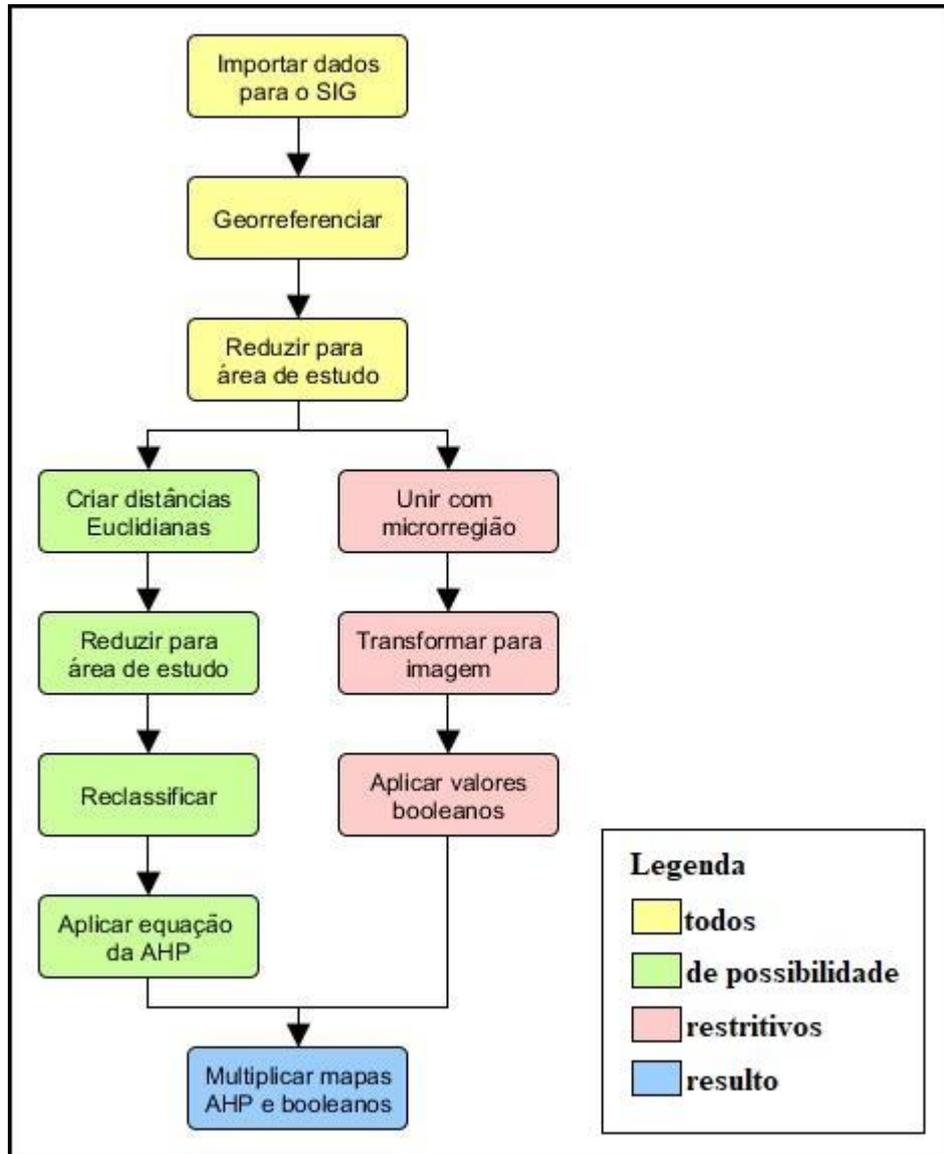
Até então, foram seguidos os mesmos passos para os dados de critérios de possibilidade e para os dados de critérios restritivos. À partir desse ponto, foram seguidos passos distintos até o resultado final, como ilustrado de forma simplificada no fluxograma da Figura 11. Para os critérios de possibilidade, foram criados mapas de distância Euclidiana²⁶. Com exceção do critério de declividade, com o qual foi criado um mapa de declividade a partir dos dados de altimetria. Os mapas gerados abrangiam uma área maior do que a área de estudo e precisaram ser novamente recortados. Em seguida, esses mapas foram reclassificados com valores variando de um a cinco, conforme disposto na Tabela 1. Por fim, os mapas gerados foram combinados com o uso da Equação 8. Os critérios restritivos foram unidos com o mapa das microrregiões, ocupando, assim, toda a área de estudo. Esse mapa, em formato vetorial, foi convertido para o formato *raster* e, em seguida, recebeu valores booleanos²⁷. Dessa forma, áreas ocupadas por critérios restritivos passaram a valer 0, enquanto as demais áreas passaram a valer 1. Esse mapa de critérios restritivos foi então multiplicado com mapa de critérios de possibilidade combinados, gerando um mapa de adequabilidade com a presença de áreas ocupadas por critérios restritivos.

²⁶ Distância Euclidiana é uma reta entre dois pontos de um plano. Ela pode ser calculada pelo teorema de Pitágoras.

Definição retirada de: <https://support.esri.com/en/other-resources/gis-dictionary/search/>, acessado em 18/06/2018.

²⁷ Valores booleanos, 0 e 1, representam respectivamente falso e verdadeiro. Mapas com esses valores foram utilizados nesse trabalho para zerar o valor de algumas células de outras matrizes *raster* sem alterar o valor das demais células dessa matriz.

Figura 11: Fluxograma simplificado dos passos seguidos durante o processamento com SIG.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4. APLICAÇÃO DO MÉTODO

4.1 EXECUÇÃO DA AMC

Conforme descrito no item 3.4 do capítulo 3, a aplicação da AHP ocorreu através de quatro passos.

(1º) Elaboração da Matriz de Comparação dos Critérios

Primeiro, foi elaborada a Matriz de Comparação dos Critérios (A), conforme indicado na Tabela 2 (página 28).

(2º) Cálculo do peso de cada critério

Neste passo, foram calculadas a matriz de comparação dos critérios normalizada (A_{norm}) e o vetor de peso dos critérios (w), como indicado nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5: Matriz de comparação dos critérios normalizada.

	Rodovias	Declividade	Urbanização	Aeródromos
Rodovias	0.09090909	0.06666667	0.05714286	0.11764706
Declividade	0.18181818	0.13333333	0.08571429	0.14705882
Urbanização	0.27272727	0.26666667	0.17142857	0.14705882
Aeródromos	0.45454545	0.53333333	0.68571429	0.58823529

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6: Vetor peso dos critérios.

Pesos
0.0831
0.1370
0.2145
0.5655

Fonte: Elaborado pelo autor.

(3º) Verificação de consistência

Neste passo foi realizada a verificação de consistência dos pesos calculados para cada critério. As Tabelas 7 e 8 representam respectivamente o Auto Vetor Principal (w_s) e o Vetor de Consistência (w_c).

Tabela 7: Auto Vetor Principal.

0.33616353
0.55176343
0.87907117
2.38672014

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 8: Vetor de Consistência.

4.04570692
4.02802435
4.09880080
4.22086870

Fonte: Elaborado pelo autor.

O Máximo Auto Valor ($\lambda_{\text{máx}}$) vale 4,09835019 e, para quatro critérios, o Índice Randômico (RI) = 0,9, conforme a Tabela 2. valor da Razão de Consistência (CR) calculado é igual a 0.036426. Como ele é inferior a 0,9, conforme a Tabela 3, a análise e os pesos obtidos são considerados consistentes.

(4º) Determinação da equação para álgebra de mapas

Depois de verificada a consistência dos pesos calculados para cada critério de possibilidade, foi possível determinar a Equação (9), utilizada no processo de álgebra de mapas para formar o mapa de adequabilidade dos critérios de possibilidade:

$$\text{Mapa} = 0,0831 \times \text{Rodovias} + 0,1370 \times \text{Declividade} + 0,2145 \times \text{Urbanização} + 0,5655 \times \text{Aeródromos}$$

(9)

Nessa equação, cada critério apresenta um peso diferente, representados por valores percentuais. Somados, esses pesos calculados totalizam 100%. Eles estão indicados em forma percentual na Tabela 9.

Tabela 9: Peso dos critérios de possibilidade.

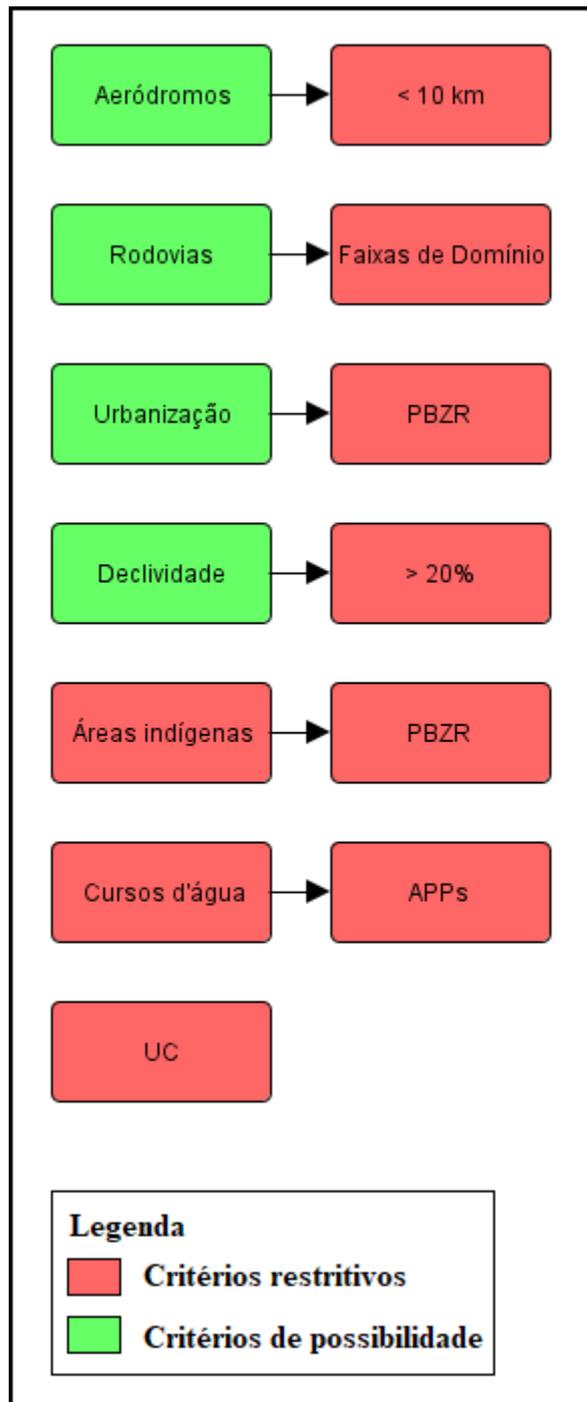
Rodovias	8,31 %
Declividade	13,70 %
Urbanização	21,45 %
Aeródromos	56,54 %

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2 PROCESSAMENTO COM SIG

Os passos seguidos para cada tipo de critério estão explicados com detalhes nos tópicos subsequentes. A Figura 12 apresenta os critérios restritivos e de possibilidade utilizados neste trabalho.

Figura 12: Critérios de possibilidade e critérios restritivos.

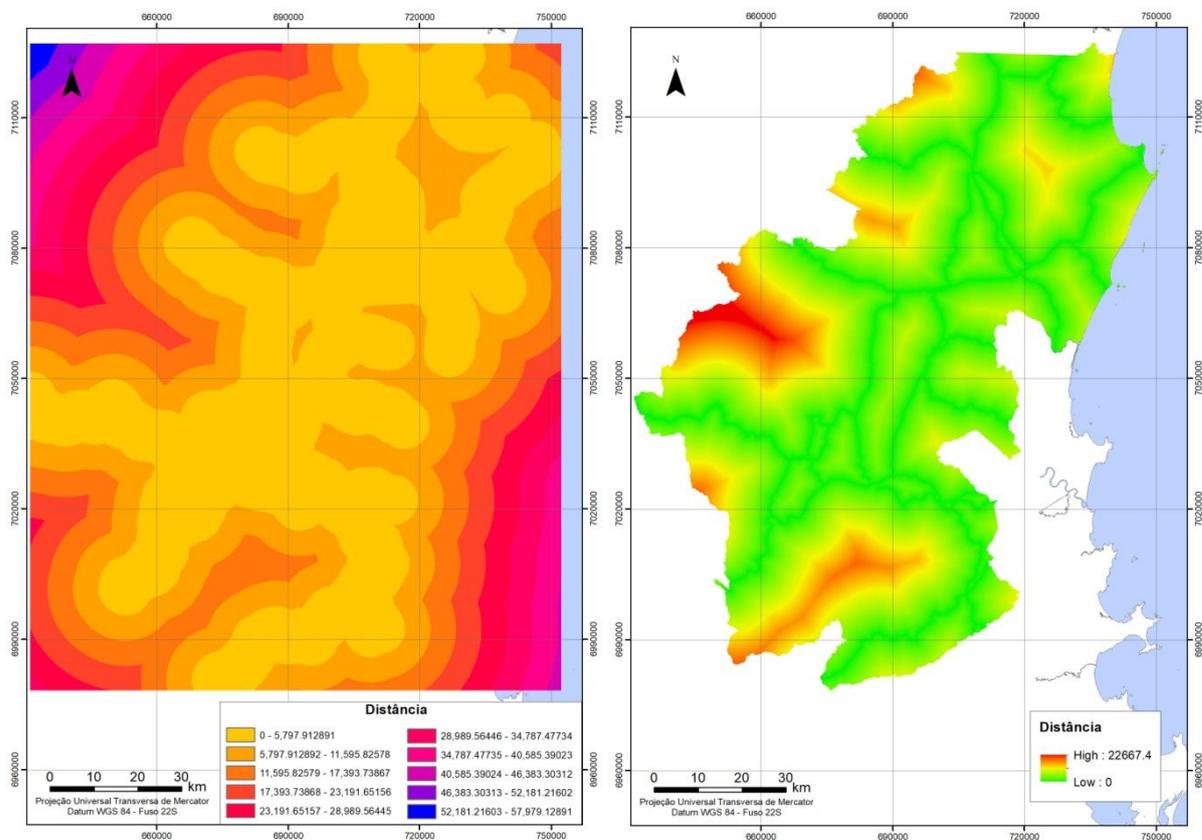


Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.1 CRITÉRIOS DE POSSIBILIDADE

Para os critério de possibilidade de rodovias e de urbanização, foram criados mapas de distância Euclidiana. Ou seja, foram gerados mapas de distância à partir das entidades geográficas desses critérios até os limites de uma área que contém a área de estudo. Esses mapas precisaram ser novamente reduzidos (ou cortados) para apenas a área de estudo. Esses processos estão representados nas Figuras 13 e 14. Os valores de distância nos mapas estão em metros.

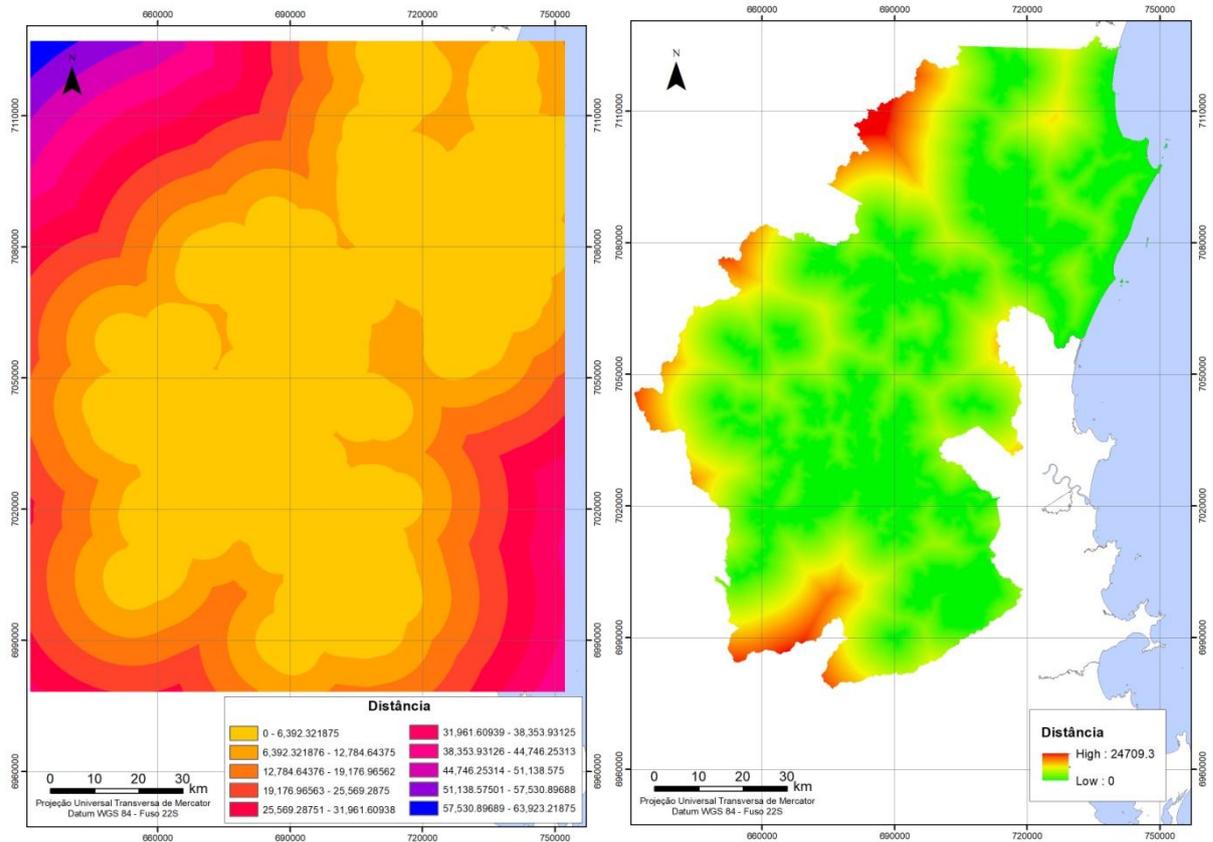
Figura 13: Mapa de distância Euclidiana original (esquerda) e cortado (direita) para rodovias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na Figura 13, as rodovias utilizadas para a geração dos mapas foram: BR 101; BR 280; BR 470; BR 477; BR 486; SC 301; SC 409; SC 411; SC 412; SC 413; SC 415; SC 416; SC417; SC 470; SC 474; e SC 495.

Figura 14: Mapa de distância Euclidiana original (esquerda) e cortado (direita) para urbanização.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Posteriormente, os mapas foram reclassificados para uma nova escala, com valores de atratividade variando de um a cinco. Essa reclassificação, representa a atratividade das terras da área de estudo em relação aos critérios de possibilidade. Assim como disposto na terceira etapa do método (item 3.3).

É importante que todos os mapas de critérios de possibilidade estejam na mesma escala para que eles possam ser combinados com a equação determinada na AHP. Ao mapa de distância euclidiana de rodovias (recortado) foram atribuídos três intervalos: de zero a três, de três a dez e acima de dez quilômetros. Esses intervalos foram os mesmos adotados por Roberto (2014). A Tabela 10 apresenta os valores de atratividade atribuídos a cada um desses intervalos. Todos os intervalos e valores de atratividade atribuídos aos mapas de critérios de possibilidade foram definidos pelo autor, com base em seu próprio entendimento.

Tabela 10: valores atribuídos aos intervalos de distância do mapa de rodovias.

Intervalo (km)	Valores
de 0 a 3	5
de 3 a 10	3
acima de 10	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa de urbanização foi dividido em cinco intervalos. Esses intervalos e os valores de atratividade correspondentes estão dispostos na Tabela 11.

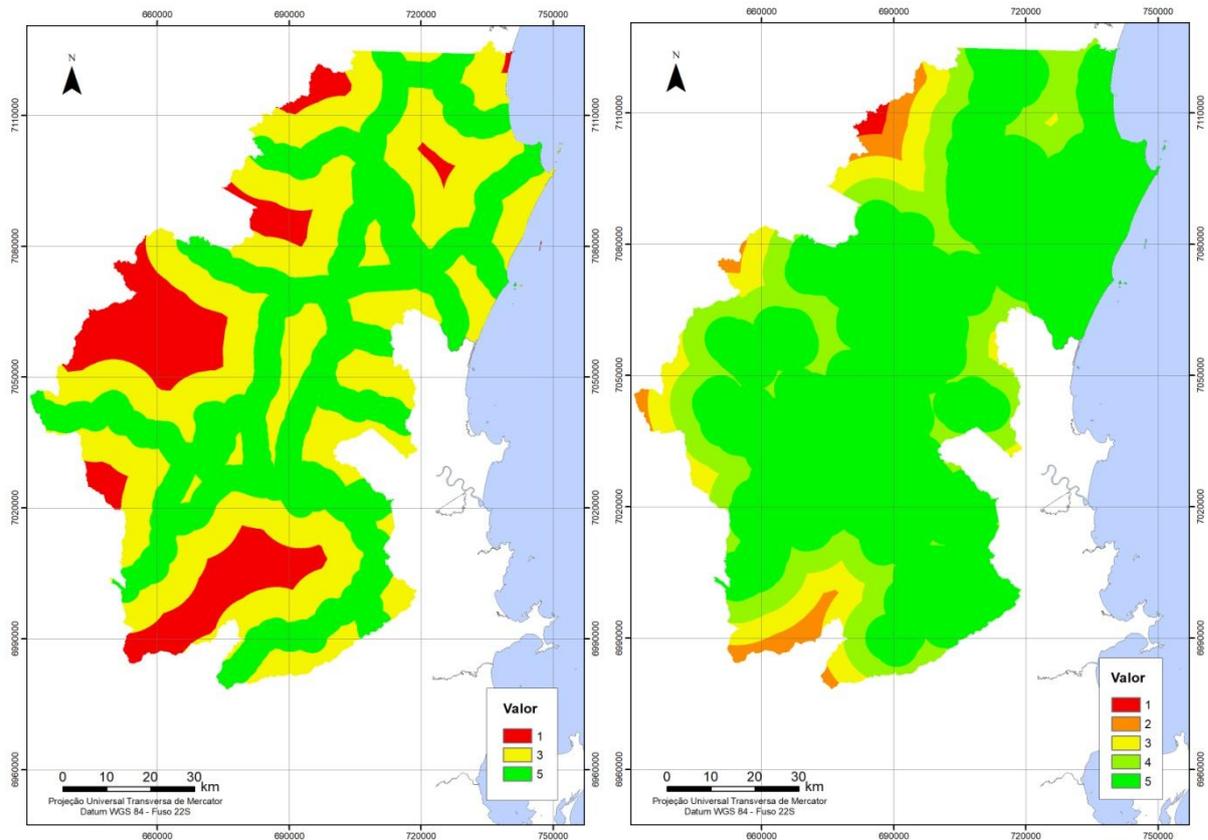
Tabela 11: valores atribuídos aos intervalos de distância do mapa de urbanização.

Intervalo (km)	Valores
0 a 5	5
5 a 10	4
10 a 15	3
15 a 20	2
acima de 20	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os mapas gerados com esses intervalos e seus respectivos valores de atratividade estão apresentados na Figura 15.

Figura 15: Mapa com valores de atratividade para rodovias (esquerda) e urbanização (direita).



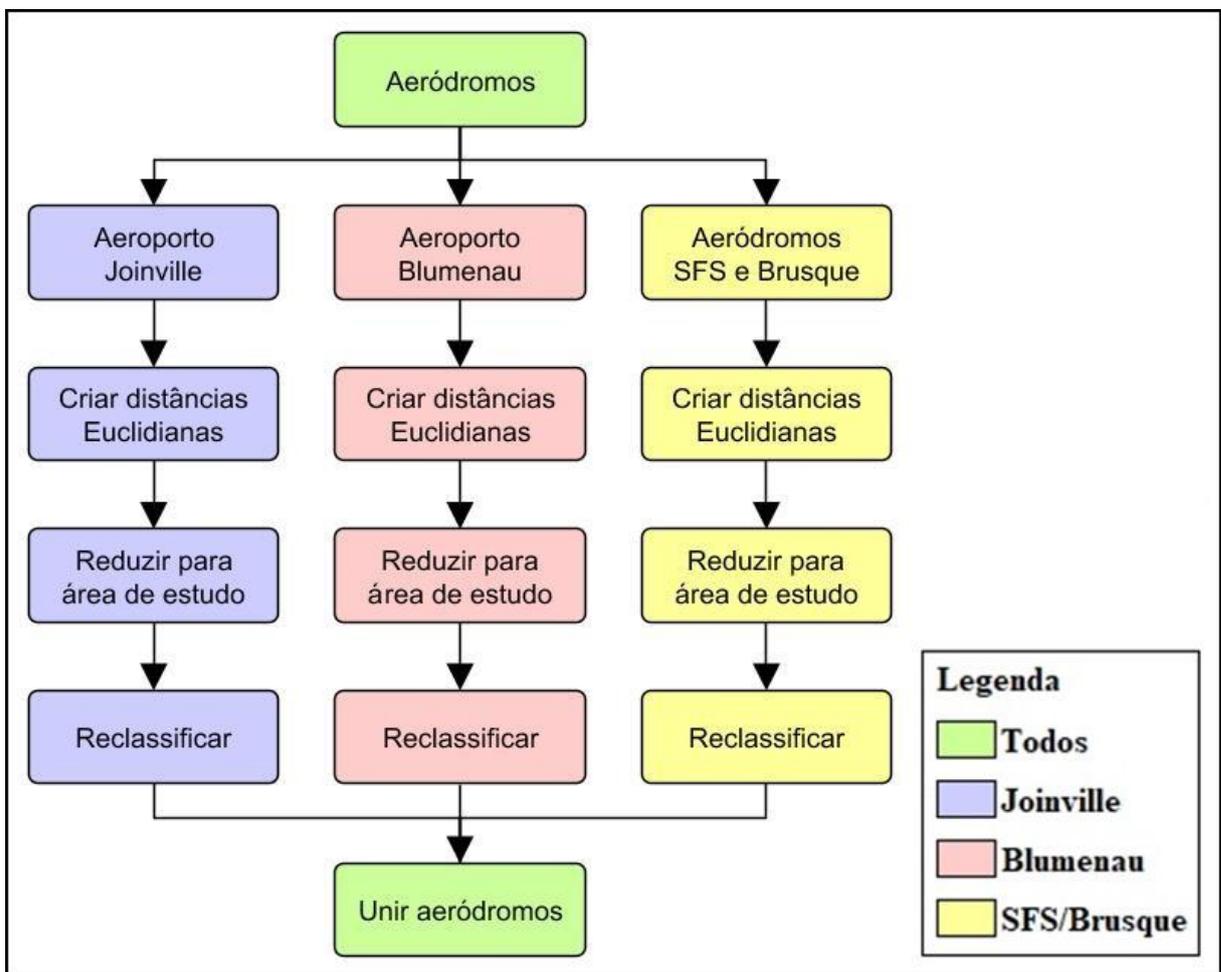
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os passos seguidos para os dados de aeródromos e de declividade diferiram em parte dos passos seguidos para os dados de rodovias e de urbanização que estão representados no fluxograma simplificado da Figura 11.

No que diz respeito aos aeródromos, o aeroporto de Joinville é o único com vôos comerciais regulares na área de estudo. Ele também apresenta o maior comprimento e a maior largura de pista, podendo operar aeronaves de maior porte. O espaço aéreo de um novo aeroporto, portanto, teria mais interferência e seria mais disputado se ele fosse construído próximo ao aeroporto de Joinville. O Aeroporto de Blumenau opera alguns vôos particulares, mas seu tráfego aéreo é muito menor. Conseqüentemente, sua influência na escolha de sítio para um novo terminal aéreo deveria ser menor. E a dos aeródromos de São Francisco do Sul e de Brusque deveria ser menor ainda. Suas pistas são de saibro ou grama e elas apresentam menores comprimentos e larguras do que as dos dois aeroportos.

Para manter essa hierarquia entre os aeroportos, o arquivo de dados de aeródromos foi separado em três: um arquivo para o aeroporto de Joinville, um para o de Blumenau e um para os aeródromos de SFS e Brusque. Para cada um desses mapas, foram seguidos os passos aplicados aos dados de rodovias e urbanização. Foram criados mapas de distância Euclidiana, que foram recortados para a área de estudo e em seguida reclassificados. O Fluxograma da Figura 16 ilustra o processo utilizado.

Figura 16: Fluxograma com os passos seguidos para os mapas de aeroportos e o de aeródromos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A hierarquização, ou a influência de cada aeroporto na escolha do sítio, foi estabelecida no processo de reclassificação. Os intervalos adotados foram baseados nos utilizados por Roberto (2014). Esses intervalos e os valores de atratividade para cada aeródromo são apresentados na Tabela 12.

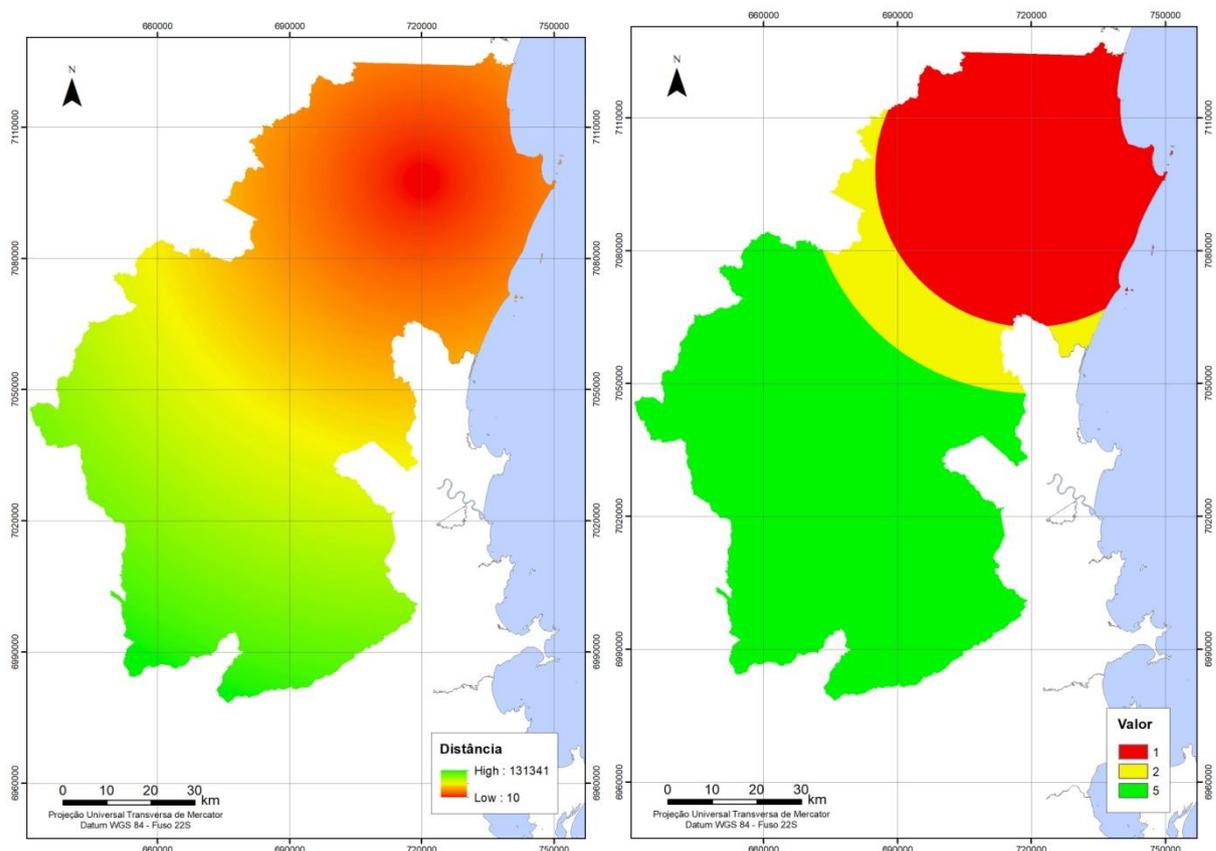
Tabela 12: valores atribuídos aos intervalos de distância dos aeródromos.

Intervalo (km)	Valores		
	Joinville	Blumenau	SFS e Brusque
0 a 35	1	2	3
35 a 50	2	3	4
acima de 50	5	5	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

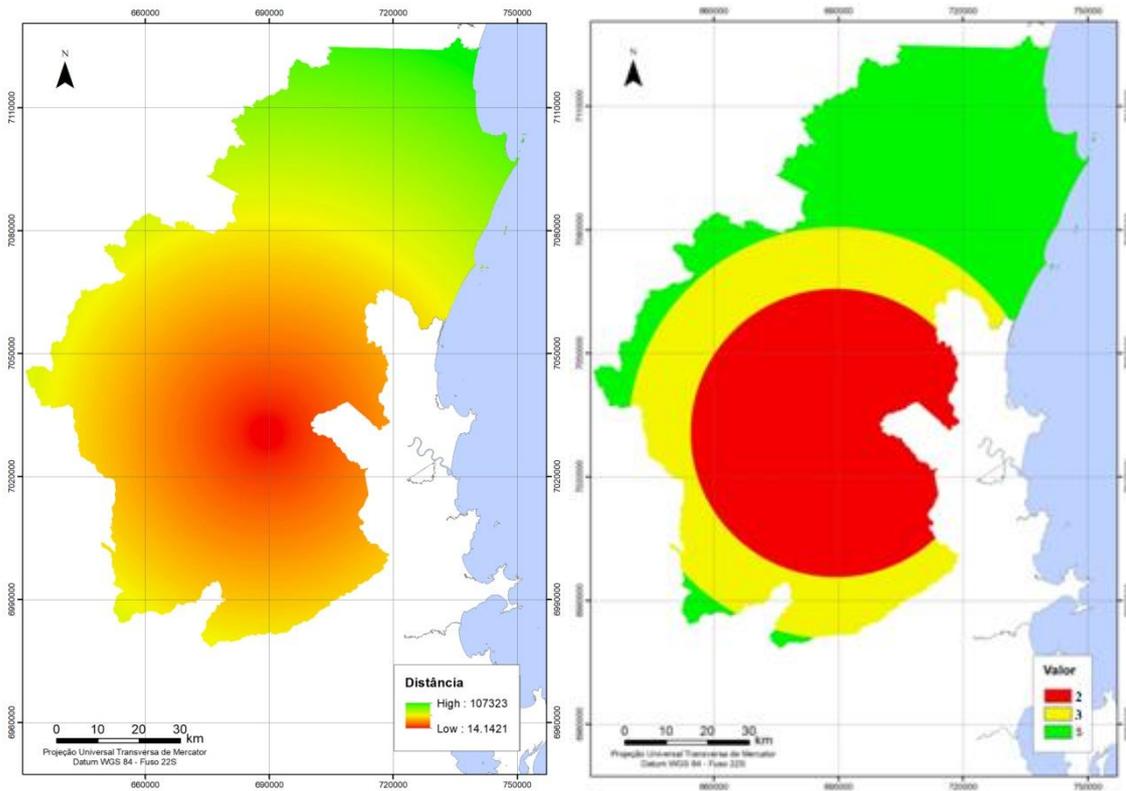
Valores mais elevados indicam maior atratividade, assim, construir um aeroporto próximo ao de Joinville é menos adequado do que próximo dos outros aeródromos da área de estudo. Os mapas dos aeródromos gerados durante os passos de redução (dos mapas de distância Euclidiana para a área de interesse) e de reclassificação (para valores de atratividade) estão ilustrados nas Figuras 17, 18 e 19. Os valores de distância nesses mapas estão em metros.

Figura 17: Mapa com valores distância (esq.) e de atratividade (dir.) para o aeroporto de Joinville.



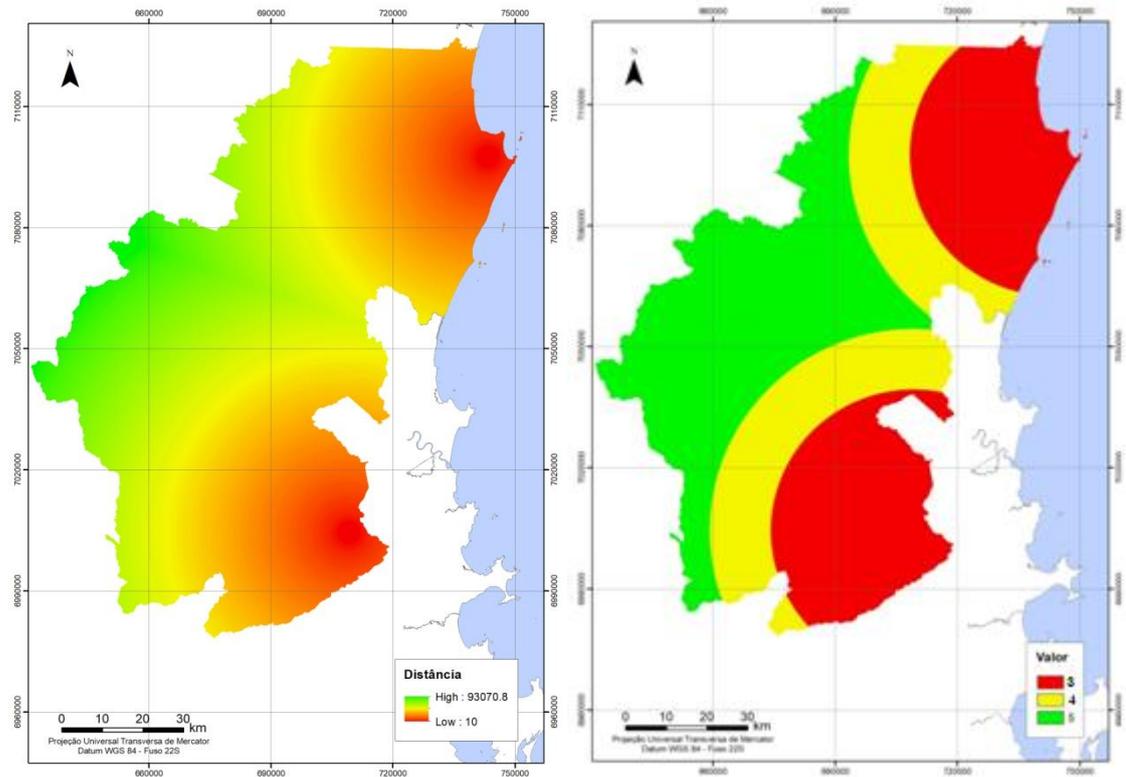
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 18: Mapa com valores distância (esq.) e de atratividade (dir.) para o aeroporto de Blumenau.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 19: Mapa de distância (esq.) e de atratividade (dir.) para os aeródromos de SFS e Brusque.



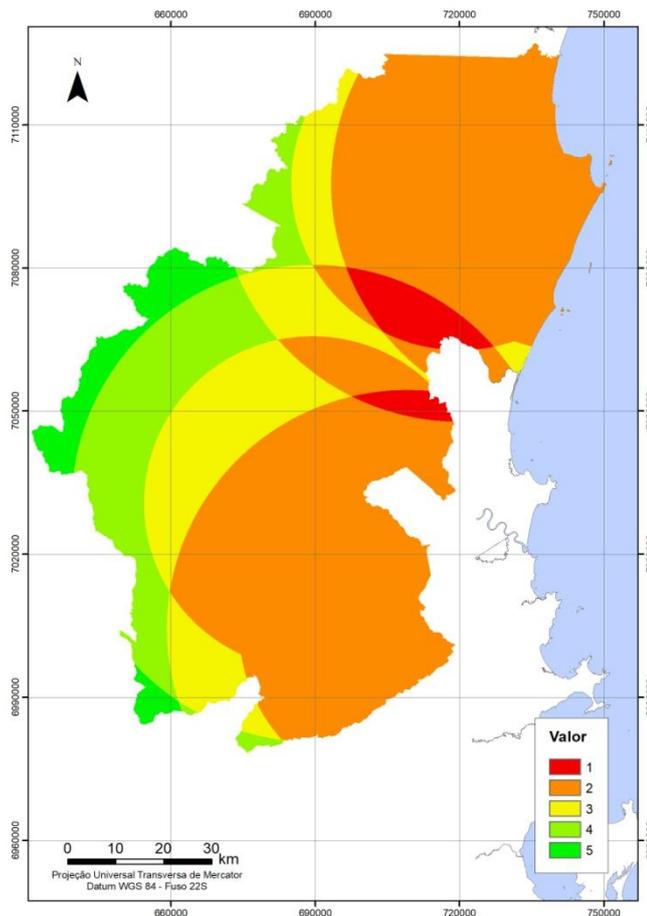
Fonte: Elaborado pelo autor.

Para unir esses três mapas de aeródromos (Figuras 17, 18 e 19), com valores de atratividade, foi empregada a Equação 10.

$$\text{Mapa unido de aeródromos} = \frac{\text{Joinville} + \text{Blumenau} + (\text{SFS e Brusque})}{3} \quad (10)$$

Dessa forma, os aeródromos foram hierarquizados e apresentaram graus de influência diferentes. Ao mesmo tempo, os valores de atratividade do mapa com os aeródromos unidos continuam na escala de um a cinco. Como foi mantida a mesma escala dos demais mapas de atratividade dos critérios de possibilidade, não houve prejuízo ao aplicar a Equação 9, obtida com a AHP. O mapa gerado pela união dos mapas de aeroportos está disposto na Figura 20.

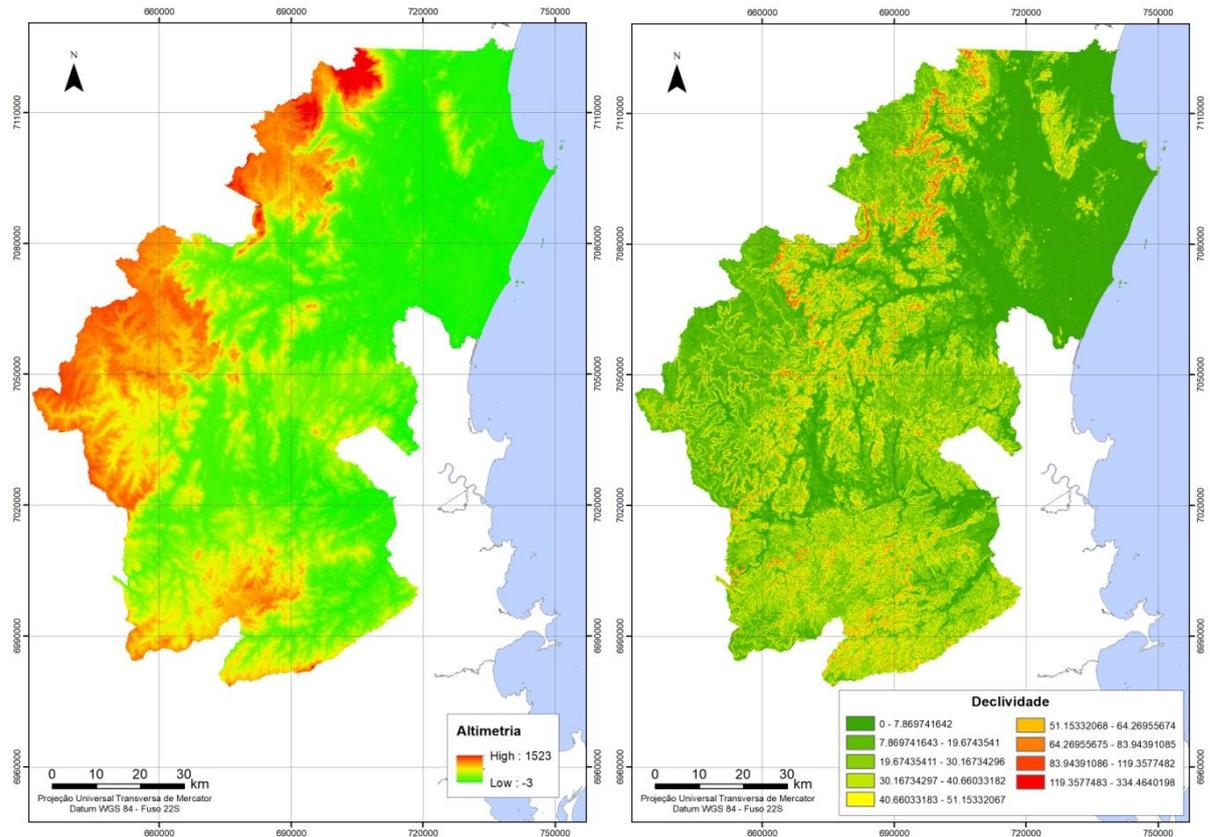
Figura 20: Mapa com valores de atratividade para os aeródromos da área de estudo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para os dados do critério de declividade, foi preciso primeiro convertê-los de dados altimétricos (obtidos durante a etapa de levantamento da base de dados) para dados de declividade, conforme indicado na Figura 21. Os valores do mapa de altimetria estão em metros e os de declividade em porcentagens.

Figura 21: Mapa de altimetria (esquerda) e declividade (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Em seguida, o mapa de declividade foi reclassificado. Foram adotados três intervalos, cujos valores associados estão indicados na Tabela 13.

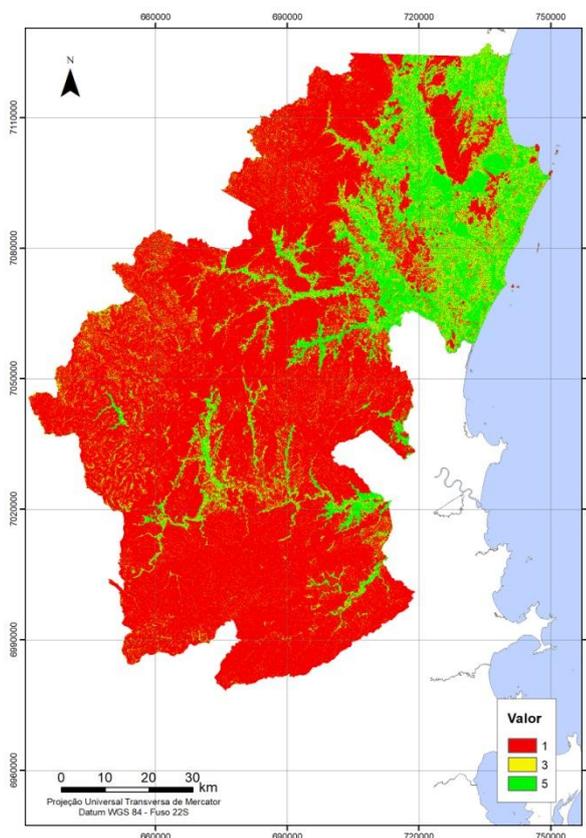
Tabela 13: valores atribuídos aos intervalos de declividade.

Declividade (%)	Valores
0 a 3	5
3 a 7	3
acima de 7	1

Fonte: Elaborado pelo autor.

O mapa com valores de atratividade gerado a partir dessa reclassificação está apresentado na Figura 22.

Figura 22: Mapa de declividade reclassificado.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Enfim, com todos os mapas dos critérios de possibilidade gerados e numa mesma escala (de um a cinco), foi possível aplicar a Equação 9, gerada na AHP²⁸. O resultado, foi um mapa que indica as áreas mais adequadas à construção de um novo aeroporto, considerando todos os critérios de possibilidade simultaneamente.

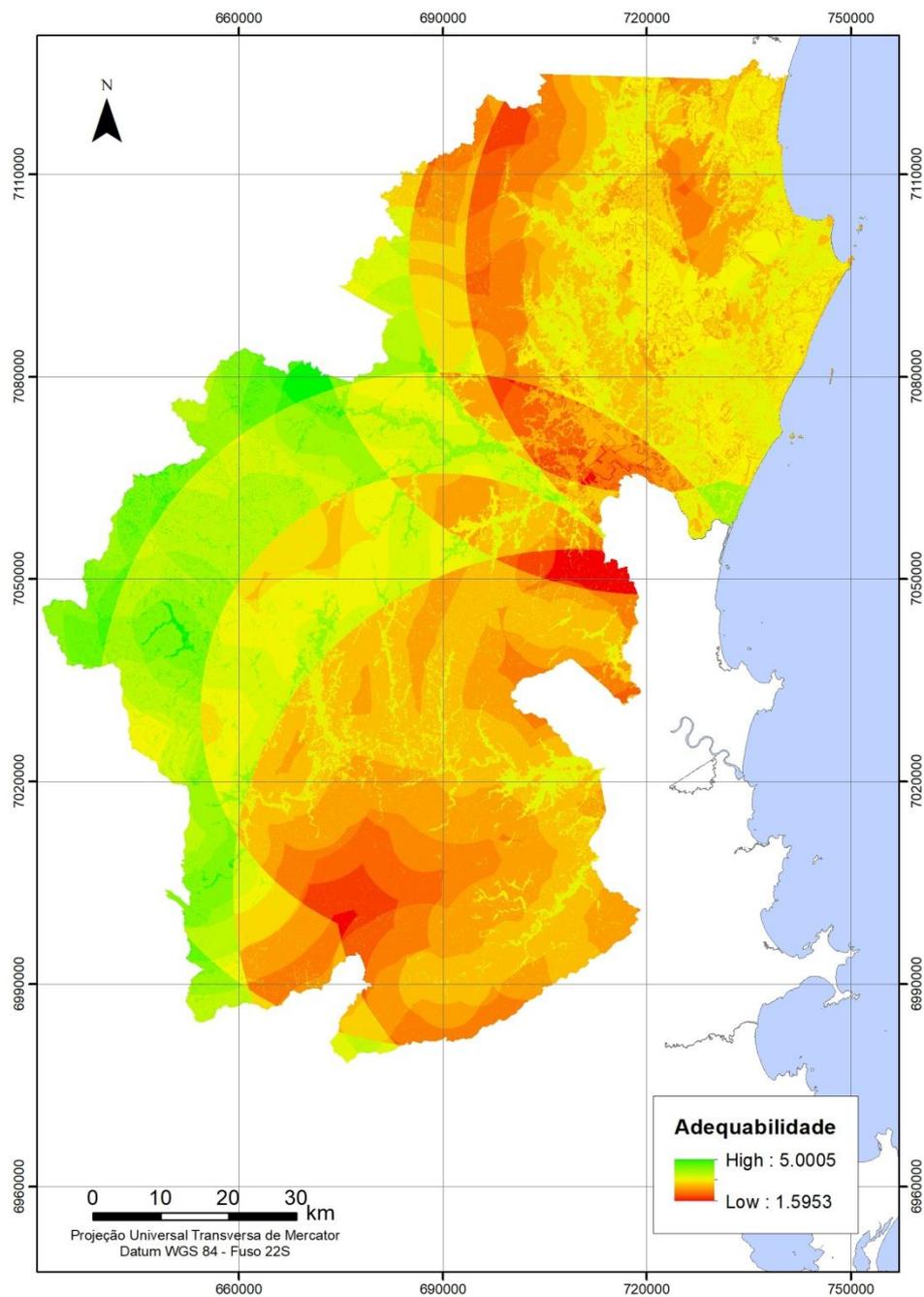
A importância de cada absoluta de um critério em relação aos demais havia sido calculada durante a AHP e está representada na fórmula pelos números que multiplicam cada critério. Ou seja, como a importância do critério de aeródromos era de 56,55%, o mapa com valores de atratividade dos aeródromos (unidos) foi multiplicado por 0,5655.

²⁸ $Mapa = 0,0831 \times Rodovias + 0,1370 \times Declividade + 0,2145 \times Urbanização + 0,5655 \times Aeródromos$

Como a soma de todos os pesos dos critérios é 1 (ou 100%), o mapa resultante manterá a mesma escala (de 1 a 5) dos mapas somados. Foi aplicada uma média ponderada aos mapas de atratividade dos critérios de rodovias, urbanização, aeródromos e declividade.

O mapa obtido com essa equação está disposto na Figura 23.

Figura 23: Mapa de adequabilidade produzido com a equação da AHP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.2.2 CRITÉRIOS RESTRITIVOS

Na segunda etapa do método foi definido que critérios restritivos são áreas sobre as quais não é admitida a construção de um aeródromo. Esses critérios são compostos pelas áreas indígenas, os cursos d'água (incluindo as APPs) e as unidades de conservação.

Contudo, a fim de obter um resultado final mais fidedigno, foi considerado que o novo aeroporto também não pode ser construído sobre algumas outras áreas. São elas: faixas de domínio de rodovias; áreas urbanas; áreas muito íngremes (com declividade acentuada); e áreas muito próximas de outros aeródromos. Essas novas considerações são explicadas nos tópicos subseqüentes.

a) Faixas de domínio.

O *site* do Departamento Estadual de Infraestrutura de Santa Catarina²⁹ (DEINFRA), define faixa de domínio como terras destinadas ao uso rodoviário, cuja extensão é determinada no projeto de engenharia rodoviária.

Conforme estabelecido no artigo 24 das Normas para o Projeto das Estradas de Rodagem de 1973, em zonas rurais a faixa de domínio tem uma largura mínima de dez metros para cada lado da rodovia, contando-se a partir das cristas dos cortes ou dos pés dos aterros. Esse artigo também estabelece que essas faixas de domínio variam de acordo com a classe da rodovia e a região sobre a qual ela está instalada, não sendo inferior aos valores da Tabela 14.

Tabela 14: Extensão da faixa de domínio de acordo com a classe da rodovia e a região.

CLASSES	REGIÕES		
	Planas m	Onduladas m	Montanhas m
I	60	70	80
II	30	40	50
III	30	40	50

Fonte: Normas para o Projeto das Estradas de Rodagem (1973).

²⁹ <http://www.deinfra.sc.gov.br/fxd/faixadedominio.jsp>, acessado em 10/06/2018.

Para simplificar o processo, foi adotado o maior valor para todas as faixas de domínio. Ou seja, de 80 metros para cada lado das rodovias. Normas mais recentes, contudo, definem faixas de domínio diferentes para cada rodovia.

b) Áreas urbanas.

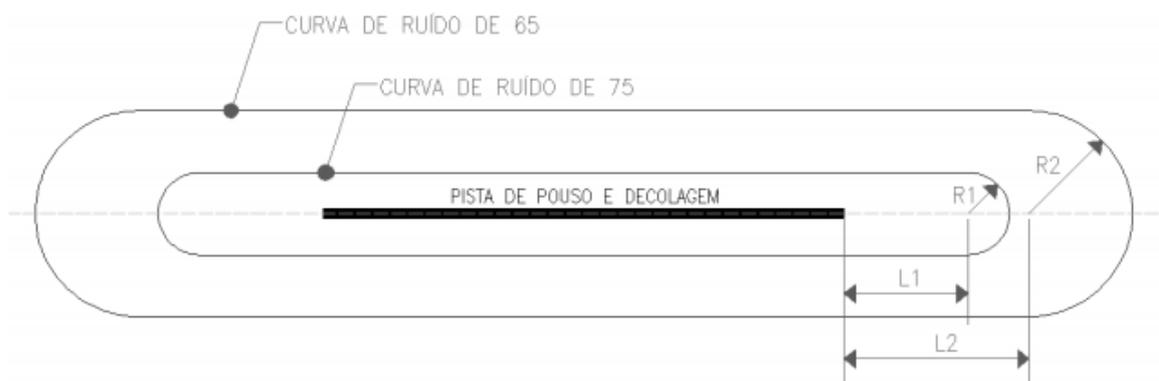
Devido a degradação ambiental, a poluição sonora e outras possíveis consequências indesejáveis³⁰ da instalação de um aeroporto, foi definido que aeroportos não devem ser construídos sobre áreas urbanas.

Contra a poluição sonora, o Regulamento Brasileiro da Aviação Civil da Agência Nacional de Aviação Civil (ANAC, 2013) determina que todo aeródromo civil ou compartilhado deve possuir, obrigatoriamente, um Plano de Zoneamento de Ruído (PZR).

Nesse regulamento, a ANAC ainda estabelece que um PZR é composto por curvas de ruído e pelas compatibilizações e incompatibilizações de uso do solo estabelecidas para as áreas delimitadas por essas curvas. Curvas de ruído são linhas traçadas em um mapa que representam níveis iguais de exposição ao ruído.

Para o Plano Básico de Zoneamento de Ruído (PBZR) de um aeroporto, são exigidas curvas de 65 e 75dB, conforme ilustrado na Figura 24.

Figura 24: Curvas de ruído de 65 e 75 dB..



Fonte: ANAC (2013).

³⁰ São exemplos de outras possíveis consequências indesejáveis os altos volumes de tráfego terrestre gerados e o desenvolvimento econômico e social decorrentes de implantação de um novo aeroporto.

A distância entre essas curvas de ruído e um aeródromo é definida de acordo com a Tabela 15. Para simplificação da análise, foi considerado que o aeroporto teria até 7 mil vôos anuais. Para casos em que a movimentação de aeronaves no aeroporto seja superior a esse valor, é necessário projetar um plano de zoneamento de ruído específico para o aeroporto analisado.

Tabela 15: Dimensões (em metros) das curvas de ruído de 65 e 75 dB.

Movimento anual	Classe	L1	R1	L2	R2
Até 400	1	70	30	90	60
de 401 a 2000	2	240	60	440	160
de 2001 a 4000	3	400	100	600	300
de 4001 a 7000	4	550	160	700	500

Fonte: ANAC (2013).

O regulamento da ANAC (2013) estabelece ainda que para um nível de ruído abaixo de 65 dB, são permitidos quase todos os tipos de uso da terra previstos sem qualquer restrição. Por isso, foi adotada a situação mais indesejável para o PBZR, em que:

$$L2 + R2 = 700 + 500 = 1200 \text{ m}$$

Para considerar o efeito do PBZR na escolha de sítio, foi criado um *buffer*³¹ de 1200 metros no entorno de áreas habitáveis. Para evitar efeitos nocivos da poluição sonora, o novo aeroporto não pode ser construído a uma distância inferior a 1200 metros de áreas urbanas e áreas indígenas.

c) Áreas muito íngremes.

Como áreas muito íngremes, foram consideradas todas as áreas com uma elevação superior a 20%, como adotado por Roberto (2014).

³¹ Em um SIG, *buffer* significa uma zona, medida em unidades de distância ou de tempo, ao redor de uma feição de um mapa. *Buffers* são úteis para análises de proximidade.

Definição de: <https://support.esri.com/en/other-resources/gis-dictionary/search/>, acessado em 18/06/2018.

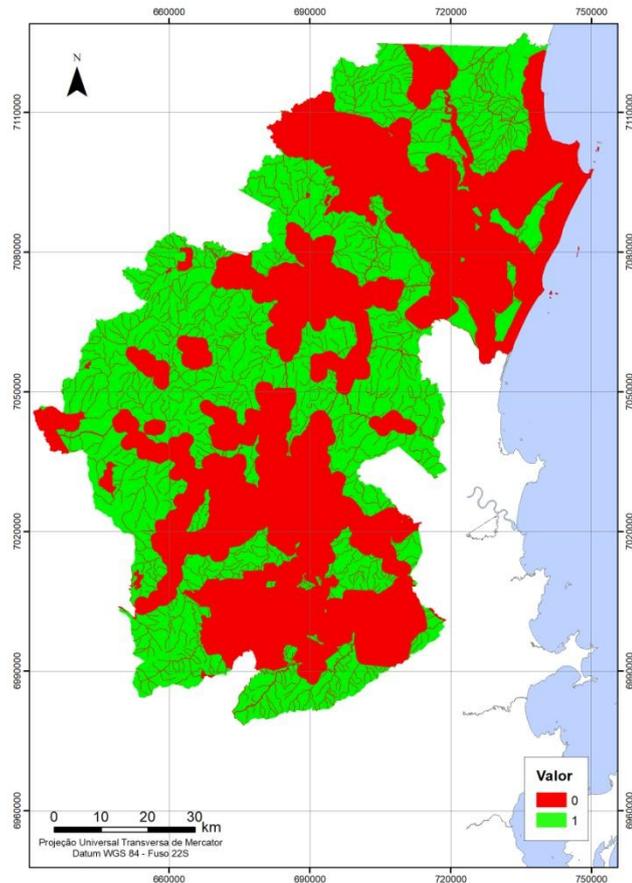
d) Áreas muito próximas a outros aeródromos.

Para evitar interferências excessivas no espaço aéreo, foi adotado um raio de dez quilômetros ao redor dos aeródromos já existentes como área inadequada para a implantação do novo aeroporto. Este valor está de acordo com o adotado por Roberto (2014).

Para se considerar essas novas restrições, foram criados *buffers* de 10 km ao redor dos aeródromos, de 80 metros no entorno das rodovias, de 1200 metros ao redor de áreas urbanas e áreas indígenas e de 50 ou 200 metros para os cursos d'água (dependendo da largura deles).

Em seguida, os dados de hidrografia, rodovias, áreas urbanas, áreas indígenas e unidades de conservação (com seus respectivos *buffers*) foram combinados, gerando um novo arquivo. Os dados desse arquivo foram combinados (por uma operação de união disponível no *software* utilizado) com o *shapefile* de microrregiões (área de estudo) e convertido para o formato *raster*. Uni-los ao *shapefile* de microrregiões é essencial para que o arquivo contenha dados de toda a área de estudos e possa ser utilizado em operações de álgebra de mapas com os outros arquivos de dados que abranjam toda a área de estudo. Esse *raster* gerado foi reclassificado. Dessa forma, todas as células da imagem que continham uma das feições restritivas receberam o valor zero. As demais, receberam o valor um. O mapa gerado por esse processo (mapa 1) está ilustrado na Figura 25.

Figura 25: (mapa 1) Mapa com valores booleanos para cursos d'água, rodovias, unidades de conservação, áreas indígenas e áreas urbanas.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O arquivo com dados de aeródromos também foi convertido para o formato *raster* e reclassificado para valores booleanos³² (mapa 2). O arquivo com dados de declividade, por já estar nesse formato, só precisou ser reclassificado. Áreas com uma inclinação superior a 20% passaram a valer zero (mapa 3).

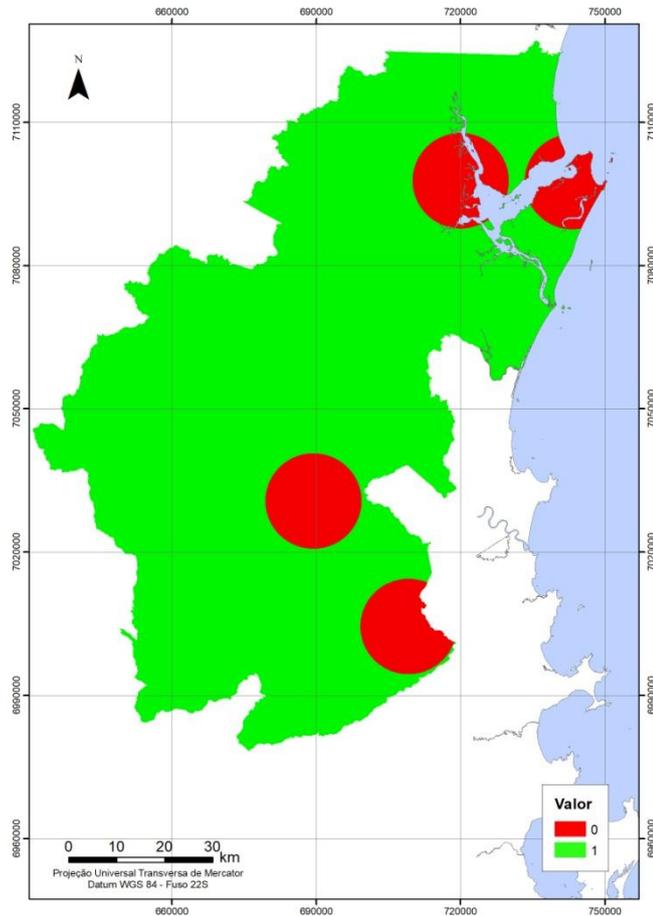
Utilizando álgebra de mapas, os mapas com valores booleanos das Figuras 25, 26 e 27 foram multiplicados segundo a Equação 11:

$$(Mapa\ 4) = (Mapa\ 1) \times (Mapa\ 2) \times (Mapa\ 3) \quad (11)$$

³² Valores booleanos, 0 e 1, representam respectivamente falso e verdadeiro. Mapas com esses valores foram utilizados nesse trabalho para zerar o valor de algumas células de outras matrizes *raster* sem alterar o valor das demais células dessa matriz.

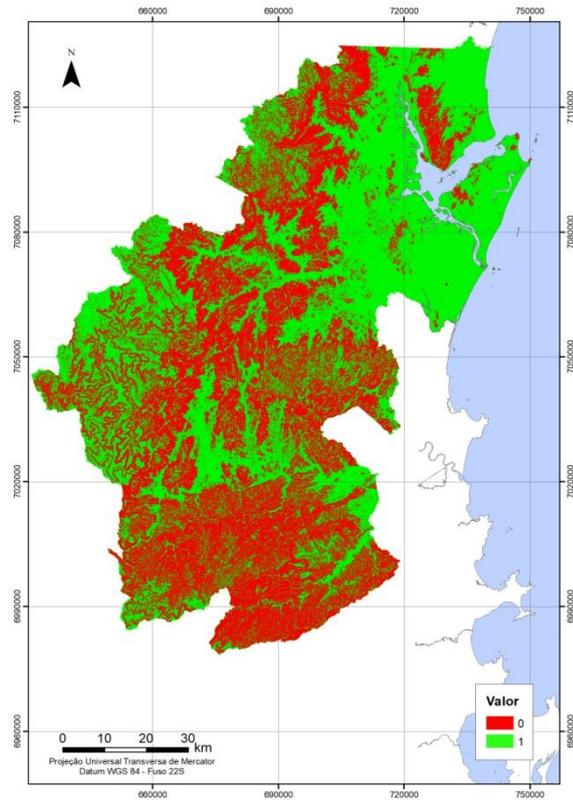
O resultado foi um mapa com todos os valores booleanos combinados (Figura 28). Os mapas 2, 3 e 4 gerados nesse processo estão apresentados respectivamente Figuras 26, 27 e 28.

Figura 26: (mapa 2) Mapa com valores booleanos para os aeródromos.



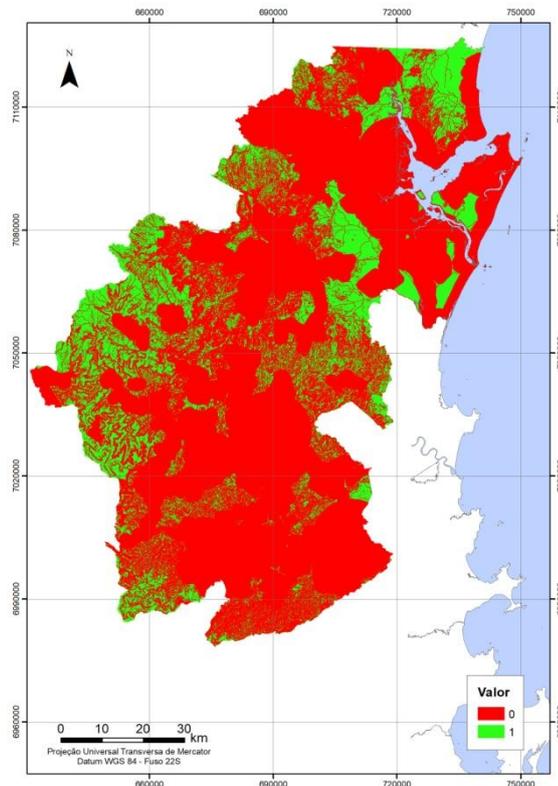
Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 27: (mapa 3) Mapa com valores booleanos para declividade.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 28: (mapa 4) Mapa com valores booleanos para os critérios restritivos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O último passo do processamento de dados com SIG foi multiplicar o mapa de adequabilidade obtido pela aplicação da equação da AHP (Figura 23) pelo mapa com valores booleanos para os critérios restritivos (Figura 28). O cálculo foi feito com a Equação 12:

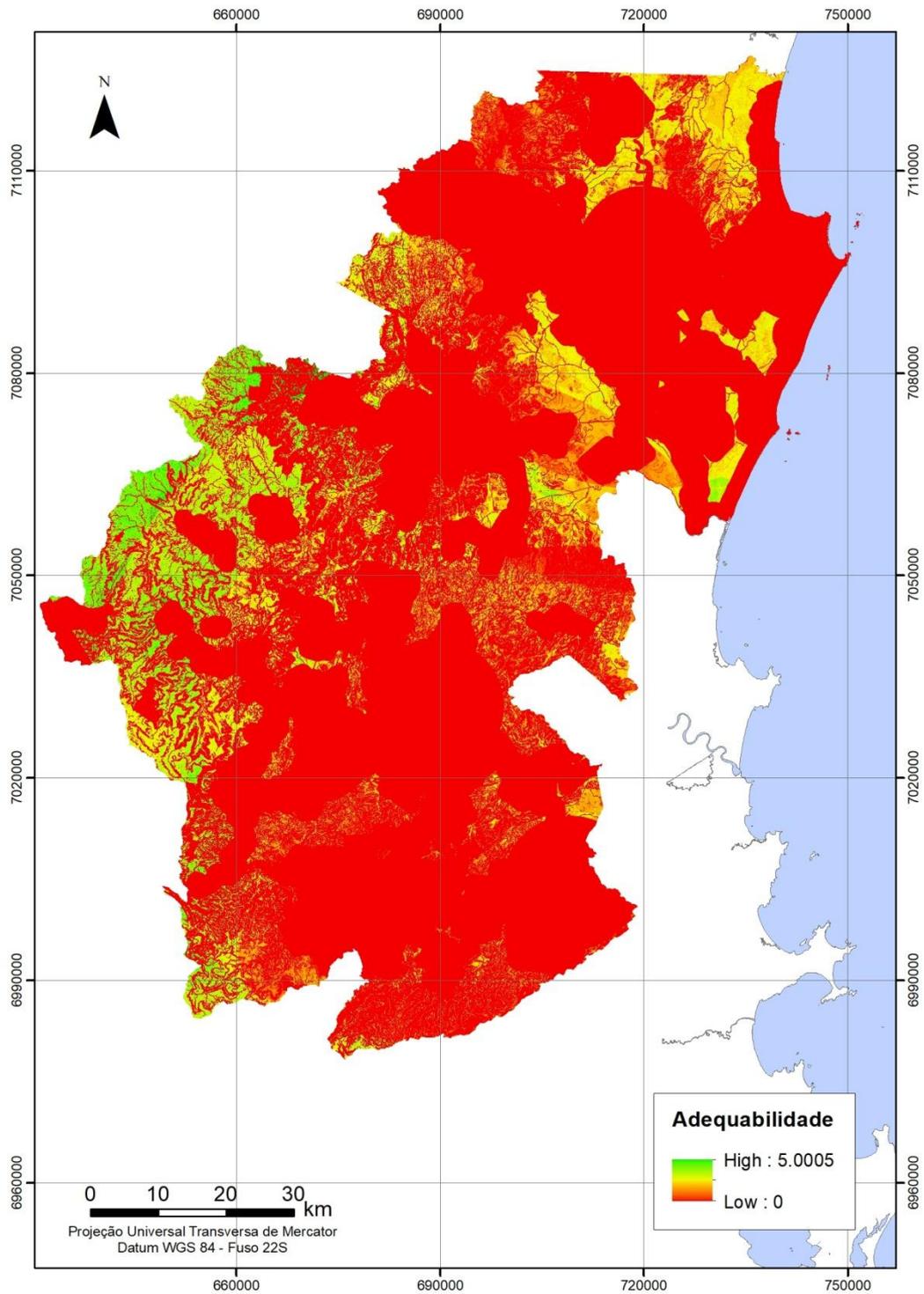
$$\textit{Mapa final} = \textit{Mapa AHP} \times \textit{Mapa booleano} \quad (12)$$

Finalmente, o mapa de adequabilidade gerado é o resultado do trabalho.

5. RESULTADO FINAL E DISCUSSÃO

O mapa de adequabilidade resultante de todas as etapas do método é apresentado na Figura 29.

Figura 29: Mapa de adequabilidade resultante da operação (mapa AHP) x (mapa booleano).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Nesse mapa, os valores de cada célula variam em uma escala de 0 a 5, sendo que quanto mais alto o valor, mais atrativa e adequada é a área para a construção de um novo aeroporto. Essa escala não é de 1 a 5, como nos mapas dos critérios de possibilidade. Isso porque o mapa resultante da equação da AHP (em escala de 1 a 5) foi multiplicado pelo mapa resultante das operações booleanas (com valores de 0 e 1). Zero, significa que a área é inadequada ou tão pouco atrativa que não será considerada para a escolha de sítio aeroportuário.

Como foram utilizados valores reais na Equação 9 da AHP (como por exemplo 0,5655), o resultado foi um mapa com valores contínuos. Para facilitar a análise o mapa final de adequabilidade foi reclassificado para valores discretos. Nesse processo, cada célula da imagem recebeu um novo valor, conforme indicado na Tabela 16.

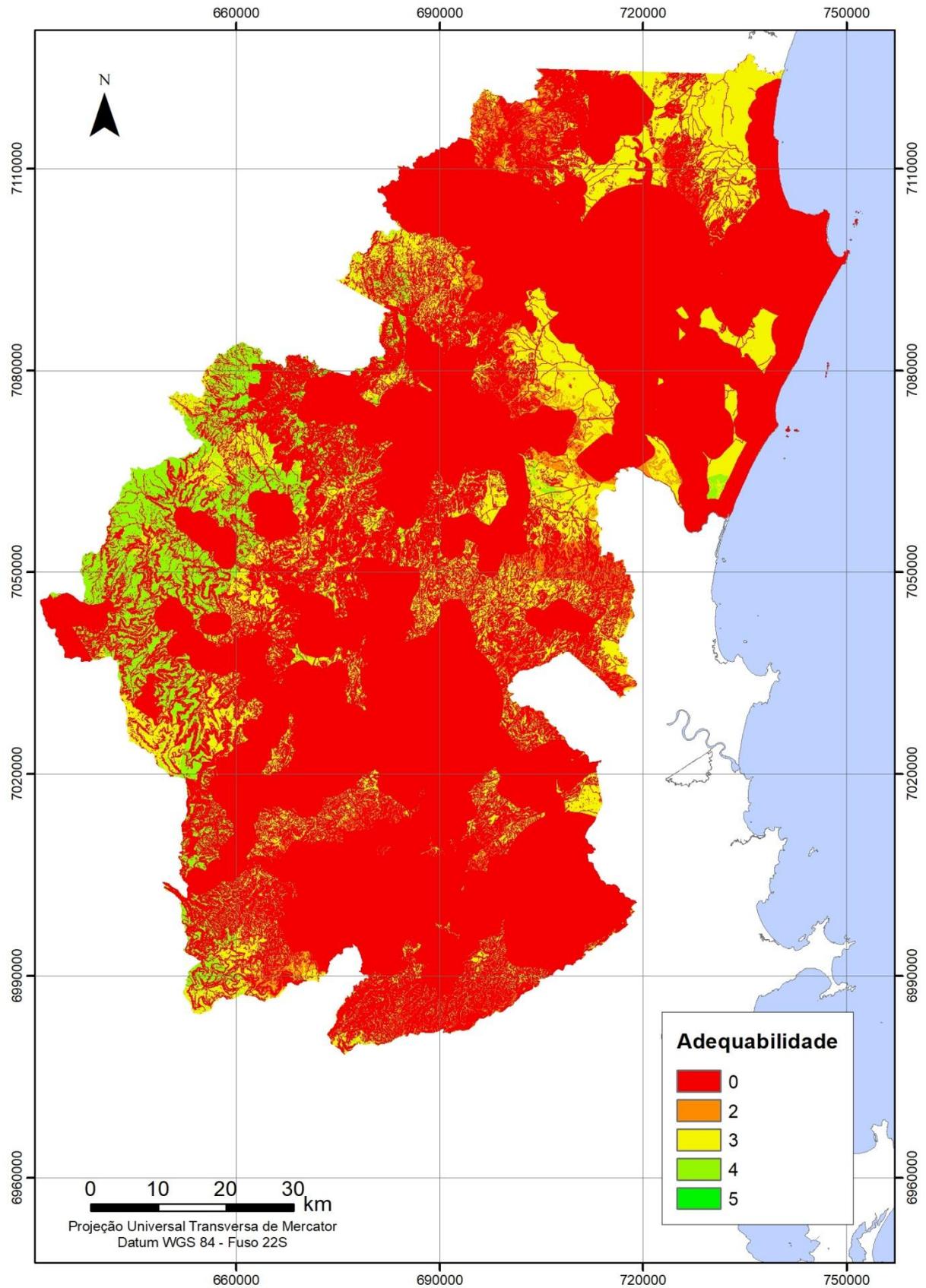
Tabela 16: valores discretos atribuídos aos intervalos de valores contínuos do mapa final.

Valores	
Contínuos	Discretos
0 a 1	0
1 a 2	1
2 a 3	2
3 a 4	3
4 a 5	4
5 a 5,005	5

Fonte: Elaborado pelo autor.

O resultado dessa reclassificação está apresentado na Figura 30.

Figura 30: Mapa de adequabilidade reclassificado para valores discretos.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Usando a tabela de atributos do mapa da Figura 30, foi possível conferir quantas células cada valor de adequabilidade possui. Com isso, foi possível calcular a área total do mapa para cada valor de adequabilidade, como indicado na Tabela 17. Esse resultado, contudo, poderia levar a conclusões equivocadas. As áreas indicadas não consideram a granulometria da imagem. Por se tratar de uma obra de grande porte e exigir grandes dimensões de pista (neste caso, 4000 metros), cuja direção de construção pode variar, é preciso encontrar grandes extensões de terras atrativas ininterruptas. Se em uma região há áreas atrativas, mas elas estão separadas por um rio, resultando em extensões de terra atrativa com áreas menores do que o necessário, essas áreas não são compatíveis com a execução do projeto.

Contudo, o raciocínio inverso também pode ser aplicado. Se há uma região com uma grande extensão de terra atrativa, mas com uma pequena colina no meio, ela poderá ser considerada incompatível ao se observar o mapa de aptidão. Porém, isso não é necessariamente verdade, uma vez que pode ser realizada uma obra para o nivelamento do terreno.

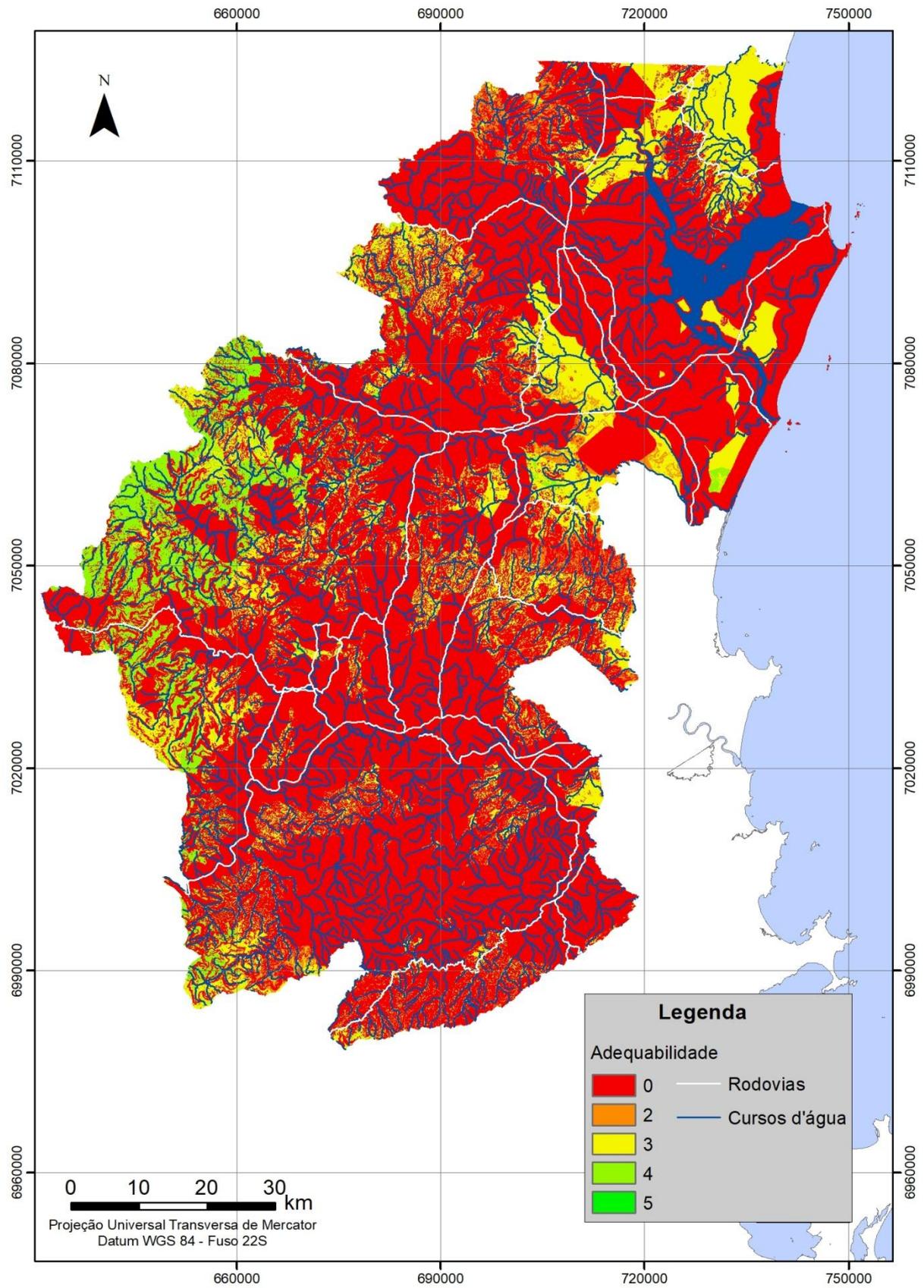
Tabela 17: Porcentagem de área do mapa final reclassificado com cada valor de adequabilidade.

Valores	Nº de células	Área (%)
0	1068432	26.94
1	0	0.00
2	267015	6.73
3	1788703	45.10
4	838407	21.14
5	3105	0.08

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para ser mais fácil analisar o mapa e sugerir uma área para a implantação de um novo aeroporto, a Figura 31 contém os rios e as rodovias da área de estudo.

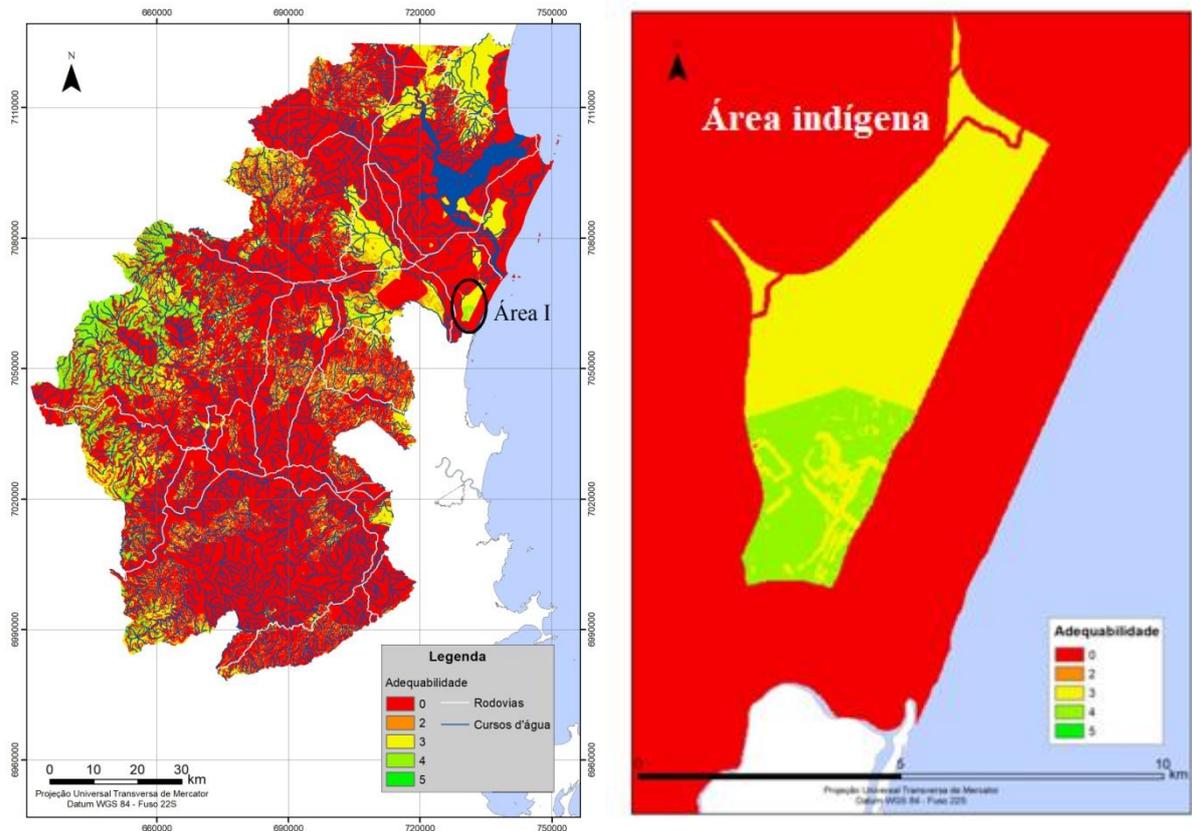
Figura 31: Mapa de adequabilidade com rios e rodovias.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando terrenos com grandes extensões de áreas planas (com quatro quilômetros ou mais de comprimento), sem cursos d'água que os cortem e mais próximos a centros urbanos, é recomendada a áreas I para a construção de um novo aeroporto que atenda as microrregiões de Joinville e Blumenau, conforme indicado na Figura 32.

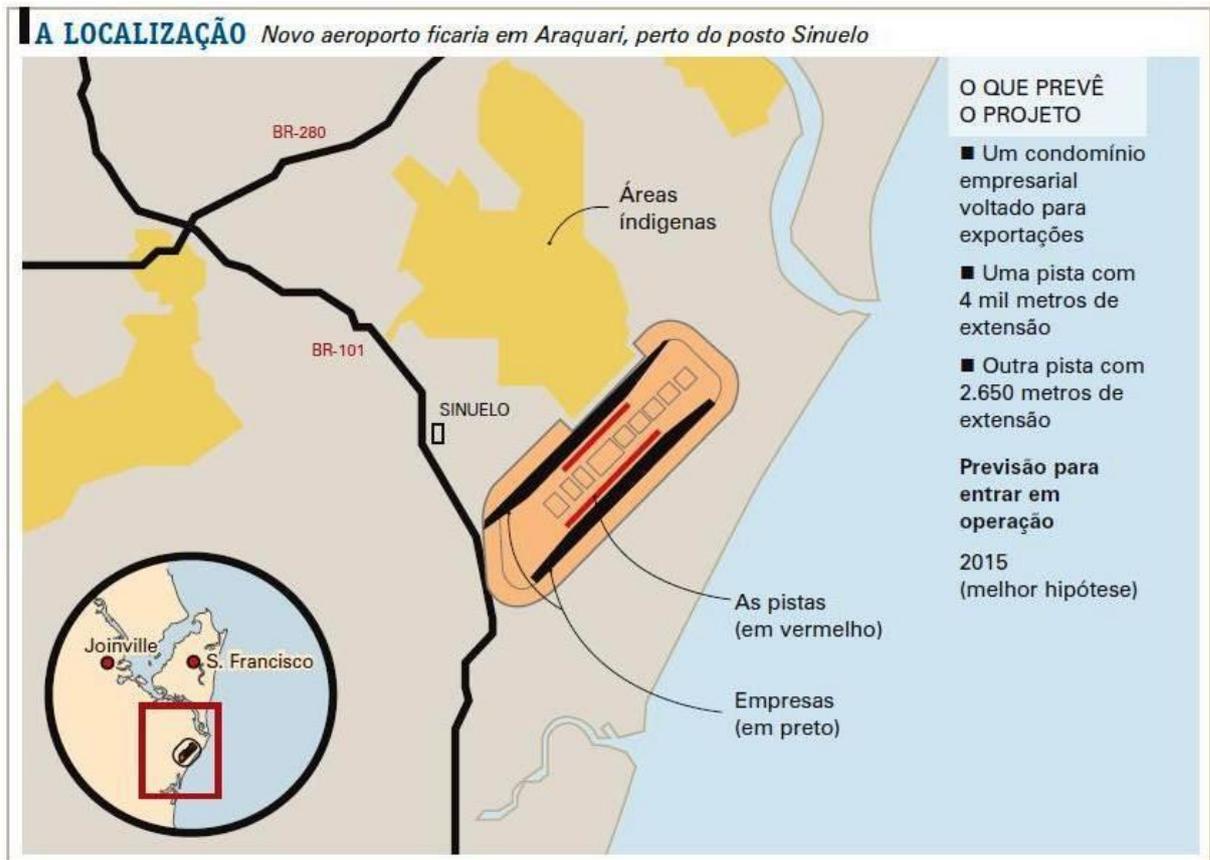
Figura 32: Mapa de localização da área I (esquerda) e mapa da área I (direita).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A área I indicada está localizada próxima de Joinville e também da rodovia BR 101, sendo portanto uma área de fácil acesso. Além disso, ela coincide com a área selecionada pela empresa SC Parcerias S/A, que seria autorizada pelo projeto de Lei 0064 de 2010 a implementar o projeto Complexo Intermodal Catarinense. Esse projeto consistiria na implantação de um terminal aeroportuário de grandes proporções direcionado ao transporte de cargas, com uma pista proposta de 4000 metros de comprimento. Contudo, ele nunca chegou a ser implementado. Um das razões alegadas foi a interferência que ele causaria nas áreas indígenas. Como pode ser observado na Figura 33, o complexo estaria muito próximo a elas.

Imagem 33: Localização do Complexo Intermodal Catarinense.



Fonte: <http://desastresaereosnews.blogspot.com/2010/03/projeto-para-novo-aeroporto-em-santa.html>, acessado em 10/06/2018.

Além disso, é importante lembrar que há sempre decisões de ordem política que influenciam na decisão final sobre a escolha do sítio, pois a construção de um novo aeroporto depende também de outros fatores além de análises técnicas. Uma possível consequência negativa da construção de um aeroporto na área estudada e que pode afetar a decisão final é, por exemplo, a competição por demanda de passageiros com os aeroportos de Joinville e de Navegantes.

6. CONCLUSÃO

O presente estudo teve como objetivo classificar áreas de acordo com sua atratividade para a implantação de um novo sítio aeroportuário nas microrregiões de Joinville e Blumenau. Com o uso de AHP e SIG, foi produzido um mapa de adequabilidade como resultado final desse trabalho. A área I, localizada em uma área plana próxima de Joinville e da rodovia BR 101, é a indicada para a construção de um novo aeródromo. Esse local coincide com a área proposta por uma empresa do ramo. Esse fato não apenas fortalece a credibilidade dos resultados obtidos, como também instiga a análise do que poderia ter sido realizado de forma diferente, a fim de melhorar ainda mais os resultados.

Dentre as limitações na aplicação do método e as dificuldades enfrentadas, estão a falta de embasamento teórico para a definição dos pesos dos critérios de possibilidade e dos valores de atratividade utilizados. A disponibilidade de dados também foi limitante para selecionar quais critérios seriam analisados. Também não foi possível entrar em contato com a empresa SC Parcerias S/A para ter acesso ao estudo técnico realizado, o que permitiria comparar os critérios utilizados e avaliar se haviam sido previstas precauções contra possíveis externalidades negativas para a área indígena próxima. O curto espaço de tempo no qual o trabalho foi realizado também limitou a aplicação de técnicas de processamento de imagens digitais que auxiliassem na escolha de uma área para a construção de um novo aeroporto. Além disso, houve problemas com o *software* de Sistema de Informações Geográficas utilizado inicialmente e o trabalho precisou ser refeito em um outro *software*, reduzindo ainda mais a margem de tempo disponível para realizar cada etapa do trabalho.

Para trabalhos futuros, são sugeridas as seguintes recomendações:

- Incluir no estudo a microrregião de Itajaí, que contém o aeroporto de Navegantes. Se sua influência tivesse sido considerada, áreas da região sudoeste do mapa de adequabilidade da área de estudo deste trabalho provavelmente teriam uma atratividade real inferior à indicada; e
- Atribuir valores de atratividade diferentes às áreas urbanas, assim como foi feito com os aeródromos. Desse modo, construir um aeródromo perto de Joinville ou de Blumenau poderia ser mais atrativo do que o fazer perto de centros urbanos menos populosos;

Ainda assim, as análises propostas puderam ser realizadas com o que foi desenvolvido ao longo desse estudo.

7. REFERÊNCIAS

ANAC. *Anuário do Transporte Aéreo: 2016*. Agência Nacional de Aviação Civil. Brasília, 29 de Junho de 2017.

ANAC. *Definições, Regras de Redação e Unidades de Medida para uso nos RBAC*. Regulamento Brasileiro da Aviação Civil. RBAC nº 01. Emenda nº 03. 8 de Junho de 2018.

ANAC. *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil*. RBAC nº 107. Emenda nº 01. 11 de Agosto de 2016.

ANAC. *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil*. RBAC nº 139. Emenda nº 02. 30 de Dezembro de 2015.

ANAC. *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil*. RBAC nº 154. Emenda nº 03. 16 de Março de 2018.

ANAC. *Regulamento Brasileiro da Aviação Civil*. RBAC nº 161. Emenda nº 01. 10 de Setembro de 2013.

ASHFORD, N. J.; MUMAYIZ, S. A.; WRIGHT, P. H. *Airport Engineering: Planning, Design and Development of 21st Century Airports*. 4ª edição. [S.l.]: Wiley, 2011. ISBN 9781118005477.

BRASIL. *Código Florestal. Lei Nº 12.651*, de 25 de Maio de 2012.

BRASIL. *Constituição da República Federativa do Brasil de 1988*.

BRASIL. *Estatuto do Índio. Lei Nº 6.001*, de 19 de Dezembro de 1973.

BRASIL. *Lei Nº 9.985*, de 18 de Julho de 2000.

BRASIL. Ministério da Defesa. Comando da Aeronáutica. *Portaria Nº 957/GC3*. 9 de Julho de 2015.

CÂMARA, G. *Modelos, Linguagens e Arquiteruras para Bancos de Dados Geográficos*. Tese de Doutorado – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 1995.

CÂMARA, G. *et al. Anatomia de Sistemas de Informação Geográfica*. UNICAMP – Instituto de Computação. Campinas, 1996.

DAVIS, B. E. *GIS: A Visual Approach*. 2ª edição. Cananda. Onword Press – Thomson Learning. 2001.

FERNANDES, E.; PACHECO R. R. *Transporte Aéreo no Brasil: uma visão de mercado*. São Paulo: Elsevier Editora Ltda, 2016.

GATRELL, A. C. *Concepts of space and geographical data*. 1991.

GDOURA, K.; ANANE, M.; JELLALI, S. *Geospatial and multi-criteria analysis to rank suitable sites of shallow aquifer recharge with reclaimed water: Application to Nabeul - Hammamet groundwater*. Laboratório de Tratamento de Águas Residuais, Centro de Pesquisa e Tecnologia de Água. Borj Cédria. 2014.

HORONJEFF, R. *et al. Planning & Design of Airports*. 5ª edição. [S.l.]: McGraw-Hill, 2010.

KASARDA, J. *Airports take off as economic centers*. China Daily – Africa Weekly. 6-12 de Fevereiro de 2015. *Comment*, página 10.

KAZDA, A.; CAVES, R. E. *Airport Design and Operation*. 3ª edição. Bingley: Emerald Group Publishing Limited, 2015.

KLEINSCHMITT, S. C.; LIMA, J. F. *Polarização e dispersão industrial nas microregiões do Sul do Brasil*. Revista Eletrônica do Programa de Pós-Graduação em Geografia – UFPR. Curitiba, v.6, n.1, p.55-75, Junho de 2011.

LOPES, E. E. *Determinação de diretrizes de traçado geométrico de obras lineares utilizando análise multicritério*. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2015.

MEDEIROS, C. B.; PIRES, F. *Databases for GIS*. UNICAMP. Campinas, 1994.

MIRANDA, J. I. *Fundamentos de Sistemas de Informações Geográficas*. 2ª edição. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010.

ROBERTO, L. *Classificação de Áreas para Implantação de Aeroporto na Região da Cidade de São Paulo*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos, 2014.

RODRIGUE, J.-P.; COMTOIS, C.; SLACK, B. *The geography of transport systems*. 3ª edição. New York: Routledge, 2017.

SCHMITT, A. *Análise de sensibilidade de diretrizes de traçados geométricos de obras lineares utilizando análise multicritério em SIG: Estudo de caso em trecho ferroviário*. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.

SOUZA, L. L. *Determinação da localização de estações de carro compartilhado em Florianópolis utilizando análise multicritério em SIG*. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017.