DETERMINANDO O POTENCIAL DE TRANSPORTE AÉREO DE UMA REGIÃO COM BASE NO MODELO DE ANÁLISE HIERÁRQUICA COPPE-COSENZA

Guilherme Weber Martins
Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
BR-465, Km 7, Campus Universitário, ICSA/DeCE, Seropédica, RJ, CEP. 23.897-000, +55 (21) 2682-1701, guilhermeweber@gmail.com

ABSTRACT

We examine the problem of determining the potential supply of air transport in a region by the COPPE-Cosenza Analytic Hierarchy Model. We assume this potential is formed only by physical, social and environmental resilience attributes of the region, capable of making feasible the construction and / or development of an airport, which meets the established requirements. Experts evaluate these requirements. From a matrix of minima requirements of demand, we apply the composition procedures of fuzzy relations and the heuristics of the COPPE-Cosenza Model to estimate the regional potentials of air transport by segments: general, executive and commercial.

Keywords: Industrial Location, Theory of Fuzzy Sets, Location Factors, Multi Criteria Decision Analysis, Air Transport.

RESUMO

Examina-se o problema da determinação do potencial de oferta de transporte aéreo de uma região pelo Modelo de Análise Hierárquica COPPE-Cosenza. Admite-se que esse potencial é formado apenas por atributos físicos, sociais e de resiliência ambiental da região, capazes de viabilizar a implantação e/ou desenvolvimento de um aeroporto que atenda aos requisitos estabelecidos. Esses requisitos são avaliados por especialistas. A partir de uma matriz de requerimentos mínimos da demanda, são aplicados os procedimentos de composição de relações fuzzy e a heurística do Modelo COPPE-Cosenza para estimar o potencial regional de transporte aéreo por segmento: geral, executiva e comercial.

Palavras Chave: Localização Industrial, Teoria dos Conjuntos Fuzzy, Fatores Locacionais, Análise de Decisão Multicritério, Transporte Aéreo

1. INTRODUÇÃO

A compreensão da influência da localização espacial no processo produtivo vem ocupando as mentes de empresários, agentes governamentais e teóricos da localização há mais de dois séculos. De fato, a questão de "onde produzir", ou seja, onde localizar a planta produtiva, bem como o consequente estudo das relações entre os fatores intervenientes na localização, são, *a priori*, questões com implicações vitais nas estratégias empresariais e nas políticas de desenvolvimento de uma região ou país.

Nesse equacionamento, cabe aos *policy makers* regionais, assim como ao empresariado, a identificação dos setores com vocação para o desenvolvimento ou especialização industrial em um determinado espaço geográfico, ou, da perspectiva da análise espacial, a identificação daqueles fatores regionais que tornam certos locais mais atraentes para determinados setores industriais.

Alguns fatores locacionais são considerados gerais para grande parte, senão a totalidade das indústrias. Em artigo publicado por BADRI (2007), baseado em uma revisão das teorias da localização e em extensa pesquisa empírica, realizada com a participação de mais de 2100 empresas em 23 países, 14 fatores locacionais foram reconhecidos como críticos para a localização industrial. Dentre esses fatores, estão os serviços de transporte, cuja contribuição para a atratividade de uma região para fins de implantação e desenvolvimento de atividades industriais é amplamente reconhecida.

No que tange ao critério de atratividade relativa, a modalidade aérea se destaca, em razão da marcante característica de rapidez, aliada à maior capacidade de carga das modernas aeronaves. Devido a isso, os aeroportos, que são peças de infraestrutura do transporte aéreo essenciais para a provisão dos serviços de apoio às aeronaves, passam a ser determinantes críticos do potencial de serviços aéreos regionais.

Em alguns casos, os aeroportos podem transformar uma região em uma "real" possibilidade de localização, mantendo ou ampliando o estímulo à decisão de investir em uma determinada atividade produtiva, podendo ainda agregar valor ou utilidade às demais potencialidades.

Um outro aspecto digno de nota é que diferentes papéis atualmente exercidos por aeroportos em cadeias de suprimento permitem compreendê-los como infraestrutura de apoio logístico para as grandes empresas e como importante elemento de suporte de suas estratégias competitivas. Isto se torna mais claro, diante do dinamismo econômico contemporâneo, caracterizado por um ambiente de concorrência, cujas marcas são a intensa profusão de inovações tecnológicas, a financeirização da riqueza mundial, o desenvolvimento de grandes competidores internacionais e a maior internacionalização do comércio.

Assim, ao se avaliarem potencialidades regionais, visando à escolha de localização industrial, os aeroportos (e/ou suas possibilidades de implantação e desenvolvimento) destacam-se como componentes críticos do potencial de oferta (dos serviços) de transporte aéreo, exigindo para a determinação deste potencial um tratamento diferenciado, para que sua importância relativa nessa escolha seja evidenciada de forma adequada.

O objetivo deste trabalho é desenvolver uma abordagem fuzzy para determinar o potencial regional de oferta de serviços de transporte aéreo e representá-lo como um matriz de componentes fuzzy hierarquizadas, capaz de ser utilizado na matriz de potencialidades regionais para fins de avaliação e escolha de localização industrial.

A contribuição pretendida reside, portanto, na parametrização fuzzy das condições atuais ou potenciais dos atributos relevantes de infraestrutura de transporte aéreo nas regiões alternativas e sua representação na matriz de oferta regional, como segmentos de serviços aéreos, isto é, nos mesmos parâmetros da matriz de demanda da indústria por tais serviços.

2. METODOLOGIA

A hipótese central admitida nesta trabalho para abordar o problema em questão, isto é, o problema da determinação e representação paramétrica do potencial regional de oferta dos serviços de transporte aéreo como um vetor ou matriz de componentes fuzzy hierarquizadas, no processo de localização industrial, foi a de que esse potencial pode ser estimado apenas a partir das condições atuais ou potenciais dos atributos físicos, operacionais e de resiliência ambiental da infraestrutura aeroportuária da região, formalizadas em termos fuzzy.

Como hipótese complementar, admitimos que problemas de representação paramétrica dessa natureza, por envolverem aspectos objetivos e subjetivos, são mais passíveis de serem avaliados por métodos híbridos (quantitativo-qualitativos). A justificativa para este pressuposto é que métodos híbridos têm estrutura e procedimentos capazes de tratar e manipular simultaneamente variáveis quantitativas e qualitativas.

De um modo geral, para variáveis quantitativas, existe um razoável conjunto de processos clássicos de tratamento matemático formal e rigor científico comprovados, enquanto, para variáveis qualitativas, os processos são mais empíricos e com tratamentos heurísticos.

Valores de variáveis qualitativas (aqui também denominadas de variáveis linguísticas) normalmente são expressões em linguagem natural, estimadas com base na percepção de especialistas, o que implica processos de avaliação classificados como essencialmente subjetivos.

A pesquisa relativa ao desenvolvimento da abordagem proposta teve como referencial teórico o Modelo de Análise Hierárquica COPPE-Cosenza (COSENZA, 1980) e os princípios, conceitos e referências bibliográficas introduzidos pelas disciplinas “Economia Urbana e Regional”, “Estratégia Nacional”, “Economia Matemática para Projetos” e “Introdução à Lógica Fuzzy”, do Programa de Engenharia de Produção, da COPPE / UFRJ, esta última, em particular, no que concerne aos procedimentos de composição de relações fuzzy.

No que concerne às especificidades do transporte aéreo, no entanto, o referencial teórico abrangeu conceitos, princípios e pressupostos básicos do processo de avaliação e escolha de sítio aeroportuário (OACI, 1987), que modelam a análise das componentes quantitativas e qualitativas caracterizadoras da demanda e da oferta de infraestrutura aeroportuária em índices capazes de explicitar a informação necessária para o processo de escolha de sítio, fornecendo uma avaliação mais objetiva da infraestrutura aeroportuária como potencialidade regional.

Em se tratando de uma abordagem teórica, derivada diretamente de um modelo já amplamente conhecido e explorado - o Modelo de Análise Hierárquica COPPE-Cosenza - não achamos necessário utilizar um estudo de caso ou um exemplo ilustrativo. Em sua totalidade, a abordagem contém elementos pragmáticos suficientemente claros e autoexplicativos, dispensando a exploração de exemplos hipotéticos ou simulações para comprovar ou consolidar a efetividade dos procedimentos adotados.

3. SERVIÇOS AÉREOS DEMANDADOS POR PROJETOS INDUSTRIAIS

A demanda de projetos industriais e tecnológicos por serviços aéreos inclui, em princípio, todos os possíveis segmentos de aviação ofertados pela indústria do transporte aéreo1. Porém, na prática, é comum a referência a apenas três segmentos: (1) aviação comercial (transporte de passageiros, carga de porão, pallets, contêineres etc., doméstico e internacional, regular e não regular); (2) aviação geral (táxi aéreo – transporte de passageiros eventuais e carga expressa); e (3) aviação executiva (transporte de executivos e carga expressa). É comum, também, que a demanda por transporte aéreo de uma determinada indústria seja expressa indicando o segmento ou segmentos de aviação que ela requer ou poderá requerer para viabilizar suas atividades de produção.

[1] Por indústria do transporte aéreo, são entendidos todos os diferentes tipos de transportadores aéreos: companhias aéreas prestadoras de serviços aéreos públicos regulares, prestadores de serviços aéreos privados (táxi aéreo), transportadores especializados (carga aérea, carga perigosa) etc.

No âmbito da modelagem COPPE-Cosenza, a matriz de demanda por transporte aéreo da indústria (ou indústrias) seria construída conforme exemplo hipotético mostrado na matriz da Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Matriz de Demanda das Indústrias por Serviços Aéreos

	Segmentos do Transporte Aéreo		
	Aviação Geral	Aviação Executiva	Aviação Comercial
Indústria $_A$	**CRUCIAL**	**CONDICIONANTE**	**IRRELEVANTE**
Indústria $_B$	**CRUCIAL**	**IRRELEVANTE**	**IRRELEVANTE**
....	**...**	**...**	**...**
Indústria $_I$	**IRRELEVANTE**	**CONDICIONANTE**	**IRRELEVANTE**
....	**...**	**...**	**...**
Indústria $_N$	**CRUCIAL**	**IRRELEVANTE**	**CONDICIONANTE**

Uma consulta a essa matriz mostra que a demanda da Indústria A por transporte aéreo é de:

(1) aviação geral – para transporte de passageiro eventual – em nível de requerimento CRUCIAL;

(2) aviação executiva – para transporte de passageiro executivo – em nível de requerimento CONDICIONANTE; e

(3) aviação comercial – para transporte de carga – em nível de requerimento CONDICIONANTE.

Para uma determinada indústria, considerados esses níveis de requerimento, uma região que apresentasse potencial de oferta no nível da aviação comercial teria precedência de escolha sobre outra cujo potencial de oferta atendesse apenas a aviação geral ou executiva. Os motivos disto encontram-se estreitamente relacionados aos requisitos de infraestrutura aeroportuária das aeronaves empregadas nesses segmentos.

A rigor, no processo de avaliação de regiões para fins de localização industrial, os níveis de requerimento da demanda deveriam internalizar informações sobre volumes e tipos de tráfego dos segmentos demandados pelas indústrias. Nesta proposta, porém, na qual o objetivo é determinar o potencial regional de oferta de transporte aéreo, os níveis de requerimento adotados relaxam informações sobre volumes de tráfego, incluindo exclusivamente informações pertinentes aos tipos ou segmentos de tráfego. Tais informações restringem-se às características técnico-operacionais das aeronaves empregadas nesses segmentos, particularmente as características de performance que definem os requisitos dessas aeronaves em relação à infraestrutura aeroportuária e área de entorno.

Como principais requisitos das aeronaves empregadas nesses segmentos, destacam-se os comprimentos de pista e os gabaritos das superfícies de proteção ao voo. Complementarmente, são incluídos também os requisitos de acessibilidade viária de superfície e os requisitos de resiliência ambiental.

Comprimentos de pistas requeridos por aeronaves típicas da aviação comercial variam de 2.100 a 3.600m. Contudo, é importante notar que não é válido admitir que quanto maior a aeronave, maior o comprimento de pista requerido. Para grandes aeronaves, a etapa de voo também influi no comprimento de pista requerido. Portanto, na análise desse requisito, estimativas das etapas de voo são importantes. Já para a aviação geral, os comprimentos de pista requeridos raramente excedem 600m, enquanto para a aviação executiva ficam em torno de 1.500m.

Superfícies de aproximação e decolagem para aeronaves da aviação geral têm rampas normalmente de 5% (1/20), diminuindo para 4% (1/25), para aeronaves da aviação executiva. Já para as aeronaves da aviação comercial, essas rampas variam de 2,5% a 2% (1/40 a 1/50). Essas rampas implicam superfícies livres de obstáculos para pouso e decolagem, no prolongamento dos eixos das pistas, variando de 1.600m a 15.000m, além das cabeceiras das pistas. Outras superfícies de proteção ao voo, do Plano Básico de Zona de Proteção de Aeródromo, tais como áreas de transição e áreas horizontais são menos restritivas e, portanto, mais passíveis de acomodar violações de obstáculos, mediante sinalização apropriada.

Requisitos de acessibilidade viária de superfície e de proteção ambiental aparecem nos documentos de planejamento e design do setor de uma forma mais vaga, mas nem por isso menos restritiva. Por exemplo, de nada adianta dispormos de área e espaço aéreo em excelentes condições para acomodar um aeroporto se não existirem condições de acesso viário. Igualmente, de nada adiantaria dispor das três condições anteriores em excelente nível de oferta se a região constituir uma reserva ambiental. Para a avaliação destes dois requisitos, portanto, lançaremos mão de valorações mais qualitativas, utilizando os padrões linguísticos sugeridos pelo Modelo COPPE-Cosenza (Superior, Bom, Regular, Fraco) (COSENZA, 1981).

Assim, a abordagem introduz uma nova matriz, constituída dos requisitos mínimos de infraestrutura aeroportuária dos segmentos de aviação, conforme mostrado na Tabela 2, a seguir.

Tabela 2: Matriz de Requisitos Mínimos de Infraestrutura Aeroportuária por Segmento de Aviação

Segmento de Aviação	Requisitos de Infraestrutura das Aeronaves			
	Pista de pouso e decolagem	Espaço Aéreo	Acessibilidade Viária de Superfície	Resiliência Ambiental
Aviação Geral	**Código 1*, com 400m de comprimento.**	**Livre de obstáculos numa extensão de 1.600m além das cabeceiras da pista c/ máx. de 5% de rampa ascendente**	**Acesso viário capaz de viabilizar a integração com o transporte de superfície**	**Sítio aeroportuário capaz de absorver os impactos mais severos do ruído aeronáutico**
Aviação Executiva	**Código 2*, com 801m de comprimento.**	**Livre de obstáculos numa extensão de 2.500m além das cabeceiras da pista c/ máx. de 4% de rampa ascendente**	**Acesso viário capaz de viabilizar a integração com o transporte de superfície**	**Sítio aeroportuário capaz de absorver os impactos mais severos do ruído aeronáutico**
Aviação Comercial	**Código 4*, com 1.800m de comprimento.**	**Livre de obstáculos numa extensão de 15.000m além das cabeceiras da pista c/ máx. de 3% de rampa ascendente**	**Acesso viário capaz de viabilizar a integração com o transporte de superfície**	**Sítio aeroportuário capaz de absorver os impactos mais severos do ruído aeronáutico**

Fonte: Manual of Airport Master Planning (OACI, 1987)

Obviamente, a viabilização de serviços de transporte aéreo em uma região depende da existência de infraestrutura aeroportuária operacionalmente segura e compatível com os requisitos técnico-operacionais das aeronaves dos segmentos de aviação. Segurança e compatibilidade operacionais da infraestrutura aeroportuária implicam oferta de atributos físicos, operacionais e ambientais, diretamente correlacionados aos requisitos de infraestrutura aeroportuária desses segmentos. É o que veremos a seguir.

4. ATRIBUTOS REGIONAIS VIABILIZADORES DA OFERTA DE SERVIÇOS AÉREOS

Para ser potencialmente capaz de viabilizar a implantação ou desenvolvimento de infraestrutura aeroportuária de suporte às operações do transporte aéreo, uma determinada região deve exibir, no mínimo, os atributos correlacionados aos requisitos de infraestrutura aeroportuária desses segmentos, no nível "regular".

A descrição da maioria desses atributos pode ser encontrada em manuais de avaliação e escolha de sítio aeroportuário. Por essa razão, referencial teórico de base para a definição dos atributos e premissas da representação da infraestrutura aeroportuária como potencialidade regional serão os conceitos e elementos descritivos incluídos no processo de avaliação e escolha de sítio aeroportuário, preconizado no contexto do planejamento aeroportuário internacional.

A Organização de Aviação Civil Internacional (OACI), agência especializada da Organização das Nações Unidas (ONU) para a aviação civil internacional, congrega especialistas do mundo inteiro na produção de diferentes conjuntos de padrões técnicos (físicos, operacionais, ambientais e de desenvolvimento) inerentes aos diversos componentes e atividades da aviação civil,

entre os quais, a infraestrutura aeroportuária. Um desses conjuntos refere-se ao processo de avaliação e escolha de sítios aeroportuários.

As principais etapas envolvidas nesse processo, tanto para um aeroporto existente quanto para um aeroporto completamente novo, incluem (OACI, 1987):

a) determinação geral da área requerida;
b) avaliação dos fatores que afetam a localização do aeroporto;
c) estudo preliminar de possíveis sítios (em mapas ou fotocartas existentes);
d) inspeção dos sítios;
e) estudos ambientais;
f) revisão dos sítios potenciais;
g) elaboração de planos de massa e estimativas de custos e receitas;
h) avaliação e seleção final; e
i) relatório e recomendação.

Da perspectiva da avaliação das condições físicas, operacionais e de desenvolvimento da infraestrutura aeroportuária existente em uma determinada região ou do seu potencial de implantação e desenvolvimento, para fins de localização industrial, as duas primeiras etapas 'a' e 'b' podem, com algumas adaptações, ser usadas para elicitar os elementos de informação necessários para a definição dos atributos e critérios de valoração. Vamos, portanto, concentrar nossa atenção no detalhamento dessas duas etapas e respectivas adaptações.

4.1. Descrição Geral do Potencial de Área e Espaço Aéreo

Padrões de segurança operacional de voo, incluindo órbitas de espera em Áreas Terminais de Tráfego Aéreo (TMA's), procedimentos de aproximação, pouso e decolagem e a movimentação das aeronaves no solo, requerem grandes áreas de terra planas e espaço aéreo do entorno livre de elevações topográficas. As áreas devem ser capazes de acomodar um sistema de pistas, pátios e instalações para processamento de passageiros e carga adequados às demandas operacionais dos diferentes segmentos de aviação, enquanto o espaço aéreo do entorno deve ser livre de obstáculos, incluindo áreas adjacentes aos aeroportos livres de implantações de natureza perigosa ao tráfego aéreo (OACI, 2002).

A área de terra necessária para acomodar as instalações aeroportuárias e o espaço aéreo associado a essa área são, portanto, os principais atributos regionais formadores do potencial de oferta de serviços aéreos. Sem esses atributos, de nada adiantarão os demais. Para a determinação das dimensões dessa área, a parcela necessária para o sistema de pistas constitui o fator crucial. A determinação dessa parcela depende, no entanto, da consideração combinada do *comprimento*, *orientação* e *quantidade* de *pistas*, elementos básicos para concepção de um "lay-out" geral desse sistema de pistas.

A quantidade de pistas é dependente dos volumes de tráfego demandados, i.e., da quantidade de aeronaves, do "mix" (tipos) de aeronaves e do padrão de chegadas e partidas a ser acomodada em uma hora do período de maior movimento. A orientação da pista é primordialmente uma função da intensidade e direção dos ventos prevalecentes na região. O comprimento de pista, por outro lado, é um requisito diretamente relacionado com as variáveis de performance operacional das aeronaves. Nesta proposta, para fins de avaliação do potencial do atributo regional *área*, o parâmetro de referência será o comprimento de pista correspondente a cada um dos segmentos de aviação considerados. Já para a avaliação do potencial de *espaço aéreo*, o parâmetro de referência será a rampa de aproximação e decolagem requerida pela aeronave crítica dos diferentes segmentos de aviação.

Todos os fatores mencionados anteriormente podem ser integrados em um requisito geral denominado *área e espaço aéreo* que pode ser quantificado em valores linguísticos, tais como "superior", "bom", "regular", "fraco" etc., a partir de regras proposicionais IF X AND Y THEN Z, relacionando os atributos considerados.

4.2. Potencial de Acessibilidade / Integração Viária

A menos que a indústria esteja instalada dentro da área patrimonial aeroportuária (situação hoje possível com o advento dos aeroportos-indústria), os serviços aéreos demandados necessitam complementar o transporte origem-destino com alguma modalidade de superfície (normalmente o rodoviário), requerendo, portanto, condições complementares de *acessibilidade viária terrestre*. Tais condições complementares também podem ser valoradas em termos linguísticos, tais como "superior", "bom", "regular", etc., de acordo com as condições existentes ou potenciais do sítio ou região.

4.3. Potencial de Resiliência Ambiental

Níveis de ruído das operações aeronáuticas de aproximação, pouso e decolagem das aeronaves e suas manobras no solo requerem, do sitio aeroportuário e suas adjacências, condições de absorção ou possibilidades de mitigação dos impactos associados, especialmente do ruído aeronáutico. Sítios mais elevados ou afastados de áreas urbanizadas satisfazem requisitos importantes, porque propiciam maior *resiliência ambiental* a tais impactos.

5. ELABORAÇÃO DA MATRIZ DE OFERTA DE TRANSPORTE AÉREO

Uma vez definidos os atributos regionais e explicitadas suas usuais valorações numéricas e/ou linguísticas adotadas por especialistas para expressar *potenciais de atendimento*, bem como suas eventuais *gradações / variações,* procederemos, nesta seção, a suas representações na forma de uma matriz de componentes hierarquizados *fuzzy,* que constitui o *potencial regional de oferta de serviços de transporte aéreo*.

Projetos industriais demandam serviços de transporte aéreo pelos diferentes segmentos de aviação: aviação geral, aviação comercial e aviação executiva. Da mesma maneira, por exigências das operações matriciais do modelo COPPE-Cosenza, as ofertas regionais devem ser também expressas pelos mesmos segmentos de aviação. Não obstante a necessidade das ofertas regionais serem expressas em termos dos segmentos de transporte aéreo, propomos aqui que a avaliação do potencial regional dessas ofertas seja caracterizado a partir dos atributos físicos, operacionais e ambientais de infraestrutura de uma região.

Acreditamos que a avaliação do potencial regional pelos atributos de infraestrutura regional reduza o grau de imprecisão, porque torna a tarefa dos especialistas mais direta e objetiva. Além disso, a utilização desses atributos possibilita tanto a avaliação das regiões que já possuem aeroportos instalados quanto das que não possuem, caracterizando o potencial regional como a capacidade da região acomodar operações de transporte aéreo. Dessa maneira, capacidade pode ser expressa pela existência de um aeroporto na região – definida em termos das condições de seus atributos físicos, operacionais e de proteção ambiental – ou, na inexistência deste, pela disponibilidade de área, espaço aéreo, acessibilidade viária de superfície e resiliência ambiental, capaz de permitir a implantação e desenvolvimento de um aeroporto.

Em termos práticos, o objetivo dessa seção é apresentar um procedimento que permita avaliar a oferta regional de serviços de transporte aéreo através de seus atributos de infraestrutura e expressá-la em termos de segmentos de aviação. Isto é, apresentar aos especialistas uma matriz de avaliação de potencialidades regionais, que chamaremos de [Φ], do tipo:

Tabela 3: Matriz Φ de Atributos Regionais de Infraestrutura de Transporte Aéreo

	B_1	B_2	...	B_k	...	B_m
Área	φ_{11}	φ_{12}	...	φ_{1k}	...	φ_{1m}
Espaço Aéreo	φ_{21}	φ_{22}	...	φ_{2k}	...	φ_{2m}
Acessibilidade	φ_{31}	φ_{32}	...	φ_{3k}	...	φ_{3m}
Resiliência Ambiental	φ_{41}	φ_{42}	...	φ_{4k}	...	φ_{4m}

Onde,

- $B_1, B_2, ..., B_m$: conjunto das localizações alternativas;
- φ_{ik}: avaliação fuzzy da alternativa de localização k, com relação ao atributo de infraestrutura i.

e transformá-la em uma matriz possível de ser inserida na matriz de disponibilidade do modelo COPPE-Cosenza, que chamaremos de [B]:

Tabela 4: Matriz B de Potencial de Oferta de Transporte Aéreo por Região

	B_1	B_2	...	B_k	...	B_m
Aviação Geral	b_{11}	b_{12}	...	b_{1k}	...	b_{1m}
Aviação Executiva	b_{21}	b_{22}	...	b_{2k}	...	b_{2m}
Aviação Comercial	b_{31}	b_{32}	...	b_{3k}	...	b_{3m}

Onde,

- $B_1, B_2, ..., B_m$: conjunto das localizações alternativas;
- b_{ik}: avaliação fuzzy da alternativa de localização k, com relação ao tipo de segmento de transporte aéreo.

Para solucionar esse problema recorreremos a um processo de relacionamento fuzzy, mais especificamente a composição de relações fuzzy, envolvendo, além das matrizes anteriormente apresentadas, uma matriz de requerimentos de infraestrutura por segmento de aviação, que será explicado a seguir. Antes, porém, é conveniente fazer uma breve revisão sobre relações fuzzy.

5.1. Composição de Relações Fuzzy

Tal como os conjuntos, relações são de importância fundamental nas ciências, nas engenharias e em outros campos de conhecimento baseados na matemática. O entendimento das relações é central para o entendimento de todas essas áreas, porque se encontra "intimamente envolvido com a lógica, o raciocínio, a classificação, o reconhecimento de padrões, o controle, a avaliação sintética ou integrada (agregada), etc" (TANSCHEIT, 2007). Relações podem ser usadas para representar similaridade, equivalência, adequabilidade, que são noções essenciais, extremamente úteis na avaliação e solução de diversos problemas industriais e tecnológicos.

Relações fuzzy generalizam o conceito de relações, ao representarem o grau de relacionamento entre elementos de dois ou mais conjuntos fuzzy. Exemplos de caráter linguístico seriam: *x é muito maior do que y*, *x está próximo de y* (PEDRYCZ; GOMIDE, 1998). Formalmente, dados dois universos *X* e *Y*, a relação fuzzy *R* é um conjunto fuzzy do produto cartesiano $X \times Y$, caracterizada por uma função de pertinência $\mu_R(x,y) \in [0,1]$, onde $x \in X$ e $y \in Y$.

Composição de relações representa um papel muito importante em sistemas de inferência fuzzy. Considerem-se primeiramente duas relações não-fuzzy *P(X, Y)* e *Q(Y, Z)* que têm um conjunto *(Y)* em comum. A composição dessas duas relações é definida como um subconjunto *R(X, Z)* de $X \times Z$ tal que $(x,z) \in R$ se e somente se existe pelo menos um $y \in Y$ tal que $(x,y) \in P$ e $(y,z) \in Q$, e é denotada por

$$R(X,Z) = P(X,Y) \circ Q(Y,Z) \quad (1)$$

Exemplo1: Sejam as relações não-fuzzy definidas pelas seguintes matrizes relacionais:

$P(X, Y) =$

	y_1	y_2	y_3	y_4
x_1	0	1	0	1
x_2	1	0	0	0
x_3	0	0	1	1

e

$Q(Y, Z) =$

	z_1	z_2	z_3	z_4
y_1	1	0	0	0
y_2	0	0	0	1
y_3	1	1	0	0
y_4	0	0	1	0

A composição dessas duas relações será:

$R(X, Z) =$

	z_1	z_2	z_3	z_4
x_1	0	0	1	1
x_2	1	0	0	0
x_3	1	1	1	0

A operação realizada para se obter *R(X, Z)* no exemplo acima pode ser representada por qualquer uma (embora não apenas) das seguintes expressões:

• ***composição max-min***:

$$f_R(x,z) = f_{P\circ Q}(x,z) = \{(x,z), \max_y [\min(f_P(x,y), f_Q(y,z))]\} \quad (2)$$

• ***composição max-produto***:

$$f_R(x,z) = f_{P\circ Q}(x,z) = \{(x,z), \max_y [(f_P(x,y) f_Q(y,z))]\} \quad (3)$$

Aplique-se, por exemplo, a composição *max-min* ao cálculo do elemento (x_1, z_2) de R:

$$\begin{aligned} fR(x_1,z_2) &= f_{P\circ Q}(x,z) = \{(x_1,z_2), max\,[min(f_P(x_1,y), f_Q(y,z_2))]\} \\ &= \{(x_1,z_2), max\,[min(f_P(x_1,y_1), f_Q(y_1,z_2)), min(f_P(x_1,y_2), f_Q(y_2,z_2)), \\ &\quad min(f_P(x_1,y_3), f_Q(y_3,z_2)), min(f_P(x_1,y_4), f_Q(y_4,z_2))]\} \\ &= \{(x_1,z_2), max\,[min(0,0), min(1,0), min(0,1), min(1,0)]\} \\ &= \{(x_1,z_2), max\,[0,0,0,0]\} = 0 \end{aligned}$$

Uma maneira prática de realizar as operações acima consiste em se efetuar a "multiplicação" das matrizes relacionais, tomando o cuidado de substituir cada multiplicação pela operação min e cada adição pelo operador *max*. Se, ao invés de *min*, for empregado o produto, o resultado será o mesmo.

A composição de relações fuzzy é definida de maneira análoga à apresentada acima; a expressão para a função de pertinência resultante da composição de duas relações fuzzy com um conjunto fuzzy em comum é generalizada para:

$$\mu_R(x,z) = \mu_{P\circ Q}(x,z) = \sup_y [\mu_P(x,y) * \mu_Q(y,z)] \quad (4)$$

onde a norma-t (representada por *) é normalmente o *min* ou o produto, embora seja permitido usar outras normas-t. No caso de universos finitos, a operação *sup* é o maximum.

Exemplo 2: Sejam os conjuntos de estudantes *X = {Maria, João, Pedro}*, de características de cursos *Y = {teoria (t), aplicação(a), hardware (h), programação (p)}*, e de cursos *Z = {lógica fuzzy (LF), controle fuzzy (CF), redes neurais (RN), sistemas especialistas (SE)}*. Os interesses dos estudantes (em termos das características em *Y*) são representados pela matriz relacional *P*, ao passo que as características (*Y*) dos cursos em *Z* são dadas pela matriz relacional *Q*.

$$P(X, Y) = \begin{array}{c|cccc} & t & a & h & p \\ \hline Pedro & 0{,}2 & 1 & 0{,}8 & 0{,}1 \\ Maria & 1 & 0{,}1 & 0 & 0{,}5 \\ João & 0{,}5 & 0{,}9 & 0{,}5 & 1 \end{array} \qquad Q(Y, Z) = \begin{array}{c|cccc} & LF & CF & RN & SE \\ \hline t & 1 & 0{,}5 & 0{,}6 & 0{,}1 \\ a & 0{,}2 & 1 & 0{,}8 & 0{,}8 \\ h & 0 & 0{,}3 & 0{,}7 & 0 \\ p & 0{,}1 & 0{,}5 & 0{,}8 & 1 \end{array}$$

A composição *max-min* de P e Q pode servir de auxílio aos estudantes na escolha dos cursos:

$$P \circ Q = \begin{array}{c|cccc} & LF & CF & RN & SE \\ \hline Pedro & 0{,}2 & 1 & 0{,}8 & 0{,}8 \\ Maria & 1 & 0{,}5 & 0{,}6 & 0{,}5 \\ João & 0{,}5 & 0{,}9 & 0{,}8 & 1 \end{array}$$

A composição *max-produto* proporcionaria o mesmo resultado neste exemplo, mas isto não pode ser generalizado – e se constitui numa diferença significativa entre composições de relações não-fuzzy e fuzzy.

Considere-se agora o caso especial em que a relação P é um conjunto fuzzy apenas, de forma que, em vez de $\mu_P(x, y)$, tem-se $\mu_P(x)$. Isto é equivalente a se ter X = Y e a composição torna-se somente uma função de z, denotada pela seguinte função de pertinência:

$$\mu_R(z) = \sup_x [\mu_P(x) * \mu_Q(x,z)] \quad (5)$$

Do ponto de vista operacional, tem-se a "multiplicação" de um vetor por uma matriz, observando-se as substituições adequadas de operadores; o resultado é um vetor.

A seguir mostraremos a composição fuzzy para a formação da matriz de oferta regional de transporte aéreo [B] a partir do relacionamento de duas outras matrizes, com base na teoria aqui apresentada.

5.2. Composição da Matriz de Oferta Regional de Transporte Aéreo [B]

Retomamos, assim, nosso objetivo principal, um procedimento que nos permita avaliar as diferentes alternativas de localização em termos dos atributos de infraestrutura de transporte aéreo e, no entanto, expressar o potencial regional de transporte aéreo em termos dos diferentes segmentos de transporte aéreo. De posse do arcabouço teórico da composição de relações fuzzy, podemos, agora, formalizar nosso problema.

Sejam o conjunto de segmentos de aviação *X* = {Aviação Geral; Aviação Executiva, Aviação Comercial}, o conjunto de requisitos de infraestrutura *Y* = {Área, Espaço Aéreo, Acessibilidade, Resiliência Ambiental} e o conjunto de alternativas de localização *Z* = {B_1, B_2, B_3, ..., B_m}. A oferta de infraestrutura aeroportuária pelas diferentes alternativas de localização é dada pela matriz relacional *Q(Y, Z)*, ao passo que a matriz *P(X, Y)* nos fornece as exigências de infraestrutura aeroportuária *(Y)* para cada um dos segmentos de aviação *(X)*. Desejamos estabelecer um relacionamento *R(X, Z)* potencial de oferta de transporte aéreo por segmento de aviação (X) para cada uma das alternativas de localização (Z), denotado por:

$$R(X, Z) = P(X, Y) \circ Q(Y, Z) \quad (6)$$

As relações *Q(Y, Z)* e *R(X, Z)* já foram apresentadas anteriormente como as matrizes [Φ] e [B], respectivamente. Para completarmos o processo de composição de relações fuzzy precisamos de uma terceira matriz, a matriz de relacionamentos *P(X, Y)* que definiremos a seguir.

Chamaremos a matriz de relacionamentos *P(X,Y)* de Matriz de Níveis de Requerimento de Infraestrutura Aeroportuária [P], com os diferentes segmentos de serviços aéreos nas linhas e os atributos de infraestrutura aeroportuária nas colunas, de maneira que um elemento da matriz expressa a necessidade mínima de um determinado segmento de transporte aéreo por um determinado atributo de infraestrutura.

Os requerimentos mínimos de Área e Espaço Aéreo para a prestação dos diferentes níveis de transporte aéreo foram apresentados anteriormente, tendo com base o Manual de Planos Diretores Aeroportuários (*Airport Master Planning*) da OACI (1987). Como nosso objetivo não é avaliar todos os possíveis atributos que influem no potencial de oferta de serviços aéreos, limitamo-nos a quatro atributos, sendo que delimitamos apenas os requerimentos de Área e Espaço Aéreo, por se tratarem de atributos com avaliação mais objetiva, genérica e já normatizada internacionalmente. Essas informações deverão ser, então, fuzzificadas para que possam compor uma matriz de valores fuzzy, da mesma maneira que as matrizes de demanda e oferta.

O processo de fuzzificação, realizado aqui, utiliza quatro gradações distintas, objetivando manter a coerência com o modelo COPPE-Cosenza (COSENZA, 1981). Os atributos de infraestrutura podem ser ofertados pelas regiões, então, em quatro níveis distintos, genericamente, A, B, C ou D.

Temos, assim, que o mínimo de infraestrutura para a prestação de serviços de transporte aéreo seria o necessário para a aviação geral, que classificaremos como D. A aviação executiva, por requerer maior área e espaço aéreo mais restrito que a aviação geral, exige minimamente atributos de área e espaço aéreo que classificaremos como C, pelas mesmas razões, a aviação comercial demanda minimamente B. A classificação A ficaria, então, relacionada a uma infraestrutura necessária para operar as maiores aeronaves e volumes de tráfego da aviação civil. Mais uma vez, lembramos que esses valores foram estabelecidos na seção 4, e tratam-se de parâmetros dimensionais balizadores dos atributos, de maneira que entre uma categoria e outra existem níveis diferentes de oferta de infraestrutura.

Este mesmo procedimento de avaliação e fuzzificação deve ser realizado para cada um dos atributos de infraestrutura. Uma vez estabelecidos todos esses valores, pode-se montar a matriz [P], que, considerando apenas os atributos abordados na seção anterior, toma a seguinte forma:

Tabela 5: Matriz de Níveis de Requerimento de Infraestrutura Aeroportuária P

	Área	Espaço Aéreo	Acessibilidade	Resiliência Ambiental
Aviação Geral	p_{11}	p_{12}	p_{13}	p_{14}
Aviação Executiva	p_{21}	p_{22}	p_{23}	p_{24}
Aviação Comercial	p_{31}	p_{32}	p_{33}	p_{34}

Onde p_{ij} são requisitos mínimos, em termos fuzzy, do atributo de infraestrutura j.

Os elementos dessa matriz, como foi explicado, assumem valores A, B, C e D, dependendo do mínimo requerido, de cada atributo, pelos três diferentes tipos de segmento de aviação.

Como dito anteriormente, a representação dos fatores de infraestrutura diretamente como serviços de transporte aéreo segue um procedimento simples de multiplicação de matrizes, a saber o produto da matriz [P] pela matriz [Φ]. Apesar de simples, a multiplicação das matrizes deve seguir um procedimento a partir de regras, característico do modelo COPPE-Cosenza (COSENZA, 2009).

Restrições impostas pelos atributos Resiliência Ambiental e, principalmente, Área e Espaço Aéreo podem inviabilizar completamente a implantação de serviços aéreos na região avaliada, de maneira que a inexistência de Área ou Espaço Aéreo ou baixa Resiliência Ambiental (como por exemplo a existência de áreas de proteção ambiental nos possíveis sítios) eliminam a possibilidade

de oferta de serviços aéreos na região. O procedimento de multiplicação entre os termos das matrizes [P] e [Φ] obedecerá a regra a seguir determinada.

Tabela 6: Regra de Atribuição do Produto ($\otimes$) dos Elementos de P e Φ

		Oferta de Infraestrutura				
	$p \otimes \varphi$	A	B	C	D	0
Requerimento	A	1	0	0	0	0
Mínimo	B	1 + 1/n	1	0	0	0
de	C	1 + 2/n	1 + 1/n	1	0	0
Infraestrutura	D	1 + 3/n	1 + 2/n	1 + 1/n	1	0

O produto $[P] \otimes [\Phi]$ resulta na matriz [B] apresentada anteriormente e replicada a seguir por facilidade de referência, onde, por exemplo,

$$b_{11} = (p_{11} \otimes \varphi 11) + (p_{12} \otimes \varphi 21) + (p_{13} \otimes \varphi 31) + (p_{14} \otimes \varphi 41)$$

será o potencial de oferta de Aviação Geral da Região 1.

Tabela 7: Matriz B de Potencial de Oferta de Transporte Aéreo por Região

	B_1	B_2	...	B_k	...	B_m
Aviação Geral	b_{11}	b_{12}	...	b_{1k}	...	b_{1m}
Aviação Executiva	b_{21}	b_{22}	...	b_{2k}	...	b_{2m}
Aviação Comercial	b_{31}	b_{32}	...	b_{3k}	...	b_{3m}

Da maneira como se encontra, a avaliação da potencialidade da oferta de serviços aéreos avalia e atribui mesma importância tanto às alternativas locacionais que já dispõem de aeroportos quanto às que possuem apenas potencial para sua implantação.

Ainda que a oferta de serviços aéreos de uma alternativa de localização não corresponda totalmente à demanda de determinado projeto industrial, é evidente que esta região deve receber uma nota superior a outra região, que apresenta mesma avaliação de requisitos de infraestrutura, mas que não dispõe de qualquer serviço de transporte aéreo.

Seja, então, a matriz $B^* = [b_{ik}^*]_{3xm}$ de avaliação de serviços aéreos prestados pelos três segmentos de aviação já presentes nas *m* alternativas de localização, de maneira que teremos uma matriz

$$\Gamma = [\gamma_{ik}]_{3xm} = B \oplus B^* \quad (7),$$

onde a agregação de valores segue uma adição ordinária entre os dois coeficientes, b_{ik} e b_{ik}^*.

Teremos assim uma matriz [Γ] que agrega as avaliações referentes à possibilidade de uma alternativa locacional prestar serviços aéreos referentes aos três segmentos de aviação mais os eventuais serviços de aviação já existentes. Esta matriz [Γ] é que será inserida na matriz de disponibilidade do Modelo COPPE-Cosenza, provendo o potencial de oferta de transporte das *m* alternativas de localização.

6. CONCLUSÃO

No processo de avaliação e hierarquização das potencialidades regionais, o potencial de oferta dos serviços de transporte aéreo mostra-se um elemento de informação relevante para a escolha da localização industrial, requerendo, portanto, sua determinação, um tratamento diferenciado que use uma metodologia capaz de assegurar uma adequada consideração dos atributos relevantes da formação desse potencial.

O que propusemos aqui, que acreditamos constituir uma contribuição para os estudos de localização industrial, foi solucionar esse problema pelo Modelo de Análise Hierárquica COPPE-Cosenza. Para tanto, admitiu-se que esse potencial devia ser formado apenas pelos atributos físicos,

operacionais e ambientais da infraestrutura aeroportuária existente ou potencial da região. O que se verificou durante a pesquisa foi que, avaliado como um todo, esse potencial podia resultar muito impreciso, devido a dificuldades de agregar em um único índice os valores regionais estimados para esses atributos.

Para reduzir essa imprecisão, esses atributos foram avaliados pelos segmentos de aviação em que a aviação civil é comumente classificada: aviação geral, aviação executiva e aviação comercial. Apesar de definirem com razoável precisão os níveis de demanda por transporte aéreo de projetos industriais e tecnológicos, a denotação desses segmentos não era apropriada para manipulação computacional. Entretanto, os requisitos específicos de capacidade da infraestrutura aeroportuária de apoio, associados aos parâmetros de desempenho operacional das aeronaves empregadas nesses segmentos permitiam, com o tratamento adotado, a obtenção de uma valoração dos requisitos considerados.

Com base no Documento 9184 da OACI, foram estabelecidos os requisitos mínimos de infraestrutura para área e espaço aéreo de cada um dos segmentos de aviação, permitindo assim a elaboração de uma matriz que relacionasse cada segmento de aviação a seus requisitos mínimos. De posse dessa matriz, utilizando os procedimentos heurísticos do Modelo COPPE-Cosenza e o ferramental de composição de relações fuzzy, foi possível estabelecer um relacionamento entre a oferta regional das infraestruturas aeroportuárias e os diferentes segmentos de aviação, de maneira que as regiões pudessem ser avaliadas segundo suas características de infraestrutura, mas que tivessem, no entanto, suas ofertas de transporte aéreo expressas em termos de segmentos de aviação.

A partir dessa oferta, foi definido o processo de estimação dos potenciais dos atributos físicos, operacionais e ambientais de infraestrutura aeroportuária da região por segmento de aviação, viabilizando sua formalização em um vetor de componentes hierarquizadas fuzzy, determinando o correspondente potencial de oferta de transporte aéreo da região.

7. REFERENCES

BADRI, M.A. “Dimensions of Industrial Location Factors: Review and Exploration”, Journal of Business and Public Affairs, v. 1, n. 2., 2007.

COSENZA, C.A.N. “Industrial Location Model – A Proposal” Working Paper. Cambridge University, Cambridge, UK, 1981.

COSENZA, C.A.N. “Metrics and Operators for Facility Site Selection” Sabbatical Paper. (Draft). Cambridge University, Cambridge, UK, 2009.

OACI – Organização de Aviação Civil Internacional. Doc. 9184 – Airport Planning Manual, Part 1, Máster Planning. 2nd Edition. Montreal, ICAO Publication, 1987.

OACI – Organização de Aviação Civil Internacional. Doc. 9184 – Annex 14, Vol. 1 Provisions Rleated to Runway Safety, 2002.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. Introduction to Fuzzy Sets. Cambridge, MA, MIT Press, 1998

TANSCHEIT, R. Sistemas Fuzzy. Rio de Janeiro, DEE-PUC, 2007.