

ANDRÉ LUIZ BARBOSA ARANTES DOS SANTOS

**UMA NOVA METODOLOGIA PARA A RECUPERAÇÃO
DO CAMPO DE VENTO**

**CURITIBA
OUTUBRO/2011**

ANDRÉ LUIZ BARBOSA ARANTES DOS SANTOS

**UMA NOVA METODOLOGIA PARA A RECUPERAÇÃO
DO CAMPO DE VENTO**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Ciências, pelo Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Setor de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Arinei Carlos Lindbeck da Silva

**CURITIBA
OUTUBRO/2011**

Termo de Aprovação

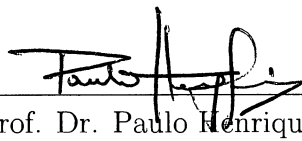
ANDRÉ LUIZ BARBOSA ARANTES DOS SANTOS

UMA NOVA METODOLOGIA PARA A RECUPERAÇÃO DO CAMPO DE VENTO

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Ciências, pelo Programa de Pós-Graduação em Métodos Numéricos em Engenharia, Sctor de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, pela seguinte banca examinadora:



Prof. Dr. Arinei Carlos Lindbeck da Silva
Universidade Federal do Paraná



Prof. Dr. Paulo Henrique Siqueira
Universidade Federal do Paraná



Dr. Reinaldo Bomfim da Silveira
Instituto Tecnológico SIMEPAR

Dedicatória

Dedico este trabalho a todos que de alguma forma contribuíram para que ele fosse realizado. Em especial a minha família que sempre me apoiou nos momentos difíceis e a minha vó Angelina que sempre me encorajou.

Agradecimentos

Pouco mais de dois anos entre a entrada no PPGMNE e a defesa da dissertação do mestrado. Nesses dois anos conheci muitas pessoas, do programa ou fora dele, portanto se esqueço de alguém peço que me perdoem.

Por primeiro agradeço a minha família, que sempre esteve comigo nos momentos bons e ruins. Principalmente a minha mãe Roseli e minha irmã Carolina que aguentaram os meus momentos de mau humor e de estresse. Mas que com suas palavras me colocaram no caminho certo, obrigado por tudo mãe e irmã. Um agradecimento especial à minha vó Angelina que sempre me apoiou, mas que não pode ver esse trabalho ser concluído.

Agradeço também o meu orientador Arinei Carlos Lindbeck da Silva que aceitou o desafio de ver o novo mundo da meteorologia. Aproveito também para agradecer a todos os professores do PPGMNE, que se esforçaram para incrementar a formação de todos os alunos.

Gostaria de agradecer os amigos Eloá, Marco e Vanessa pela paciência que tiveram comigo, por sempre estarem dispostos a dividirem os seus conhecimentos e principalmente pelo companheirismo. Não cito todos, pois corro o risco de esquecer alguém, mas saibam que lhes agradeço.

Ao SIMEPAR pelo apoio financeiro e pelos dados disponibilizados. Aqui um agradecimento ao Leonardo Calvetti pelo apoio desde o meu primeiro dia no SIMEPAR, por me apresentar o mundo novo da meteorologia e pelas preciosas revisões nos meus textos. Agradeço a todos os funcionários do SIMEPAR pelo apoio.

Aos funcionários do CESEC, em especial à Maristela sempre bem humorada.

A UFPR por proporcionar um ensino público gratuito e de qualidade.

Agradeço a todos e a cada um em especial. Essa certamente não foi uma jornada que percorri sozinho.

Epígrafe

“O único caminho sensato e seguro consiste em agir, dia após dia, de acordo com o que a própria consciência parece ditar.”

Winston S. Churchill

Sumário

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	xi
Lista de Siglas	xiii
Resumo	xiv
Abstract	xv
1 Introdução	1
1.1 Objetivo	2
1.1.1 Geral	2
1.1.2 Específicos	3
1.2 Limitações do Trabalho	3
1.3 Estrutura.....	3
1.4 A recuperação do vento	4
1.5 Radar.....	6
1.5.1 Velocidade Radial.....	10
1.6 História da recuperação do campo de vento	10
2 Revisão Bibliográfica	13
2.1 Métodos Adjuntos	13
2.2 Métodos de Correlação	14
2.2.1 TREC	15

2.3	Métodos Analíticos	19
2.3.1	VAP	19
3	Nova Metodologia.....	23
3.1	Problema de Programação Linear	23
3.1.1	Simplex	27
3.1.2	<i>Branch-and-Bound</i>	29
3.2	Nova Metodologia	31
4	Implementação.....	35
4.1	Sobre o <i>Python</i> e Lingo	35
4.2	Implementação VAP	36
4.3	Implementação TREC.....	39
4.4	Implementação da Nova Metodologia	42
4.5	Caso 1	44
4.6	Caso 2	51
4.7	Caso 3	55
4.8	Caso 4	59
4.9	Comparações	63
5	Conclusão.....	68
5.1	Sugestão de trabalhos futuros	69
	Referências	70
	Anexo A – Algoritmo do Lingo.....	73

Lista de Figuras

Figura 1	Anemômetro de hélice	5
Figura 2	Anemômetro de concha	5
Figura 3	Radar de 1944	6
Figura 4	Radar Meteorológico do SIMEPAR	7
Figura 5	PPI da Velocidade Radial(m/s)	8
Figura 6	PPI da Refletividade (Z)	8
Figura 7	CAPPI-PPI	9
Figura 8	PPI da Velocidade Radial (m/s)	11
Figura 9	Diagrama ilustrando o vento real.	12
Figura 10	PPI da refletividade (Z)	16
Figura 11	PPI da Refletividade (Z)	16
Figura 12	Raio de ação.	18
Figura 13	Figura com as etapas do método TREC	18

Figura 14	Representação de três feixes do radar.	20
Figura 15	Figura da árvore de soluções do Branch and Bound	30
Figura 16	Figura com as etapas da nova metodologia	34
Figura 17	PPI da Velocidade Radial(m/s).	38
Figura 18	Figura com as conversões da matriz.	40
Figura 19	Figura do raio de ação do box O	42
Figura 20	PPI da refletividade (Z)	45
Figura 21	PPI da Refletividade (Z)	45
Figura 22	PPI da velocidade radial (m/s)	46
Figura 23	PPI da velocidade radial(m/s)	46
Figura 24	Rede de anemômetros(m/s)	47
Figura 25	Rede de anemômetros(m/s)	47
Figura 26	PPI da velocidade radial(m/s)	48
Figura 27	PPI da refletividade (Z)	48
Figura 28	Resultado do VAP(m/s)	49

Figura 29	Resultado do TREC(m/s)	50
Figura 30	Resultado da nova metodologia(m/s)	51
Figura 31	PPI da velocidade radial(m/s)	52
Figura 32	PPI da refletividade (Z)	52
Figura 33	Rede de anemômetros(m/s)	53
Figura 34	Resultado do VAP(m/s)	54
Figura 35	Resultado do TREC(m/s)	54
Figura 36	Resultado da nova metodologia(m/s)	55
Figura 37	PPI da refletividade (Z)	56
Figura 38	PPI da velocidade radial(m/s)	56
Figura 39	Rede de anemômetros(m/s)	57
Figura 40	Resultado do VAP(m/s)	58
Figura 41	Resultado do TREC(m/s)	58
Figura 42	Resultado da nova metodologia(m/s)	59
Figura 43	PPI da refletividade (Z)	60

Figura 44	PPI da velocidade radial(m/s)	60
Figura 45	Rede de anemômetros(m/s)	61
Figura 46	Resultado do VAP(m/s)	62
Figura 47	Resultado do TREC(m/s)	62
Figura 48	Resultado da nova metodologia(m/s)	63

Lista de Tabelas

Tabela 1	Tabela dos tempos de execução dos métodos em minutos.	64
Tabela 2	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios	65
Tabela 3	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente u do teste de 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.	65
Tabela 4	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente v do teste de 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.	65
Tabela 5	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente u do teste de 8 de setembro de 2009 às 05 15 UTC.	66
Tabela 6	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente v do teste de 8 de setembro de 2009 às 05 15 UTC.	66
Tabela 7	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente u do teste de 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.	66
Tabela 8	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente v do teste de 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.	66
Tabela 9	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente u do teste de 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.	66
Tabela 10	Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a	

componente v do teste de 22 de março de 2010 às 11 45 UTC. 67

Lista de Siglas

VAP	Velocity-Azimuth Processing
TREC	Tracking Radar Echos by Correlation
PPL	Problema de Programação Linear
SIMEPAR	Sistema Meteorológico do Paraná
COPEL	Companhia Paranaense de Energia
UFPR	Universidade Federal do Paraná
ZR	Relação entre refletividade Z e chuva R
UTC	Coordinated Universal Time
PPI	Plan Position Indicator
CAPPI	Constant Plan Position Indicator
RHI	Range Height Indicator
VAD	Velocity-Azimuth Display
UW	Uniform-Wind
PPLI	Problema de Programação Linear Inteira
NP-hard	non-deterministic polynomial-time hard

Resumo

O vento é o deslocamento do ar provocado pela diferença de pressão atmosférica. A velocidade do vento pode ser medida através de instrumentos chamados anemômetros e estimada por meio de radares meteorológicos entre outros sensores de sensoriamento remoto. A medição da velocidade do vento é importante para diversas áreas, seja na meteorologia, seja para alertas de tempestades. O problema a ser resolvido nesse trabalho é analisar métodos para a recuperação do vento e a apresentação de uma nova metodologia. Os métodos de correlação usam dois, ou três, dados consecutivos de radar. Eles baseiam-se na hipótese de que em um curto período de tempo existe uma conservação do sistema, assim é possível acompanhar o sistema e determinar a direção do vento. Já os métodos variacionais utilizam a geometria do radar para a determinação do campo de vento. Estes métodos são interessantes, pois são de rápida execução. Estes foram os métodos escolhidos como objetos de estudo. Apresenta-se aqui uma vertente dos métodos de correlação. Será inserido no método de correlação um problema de programação linear para tentar alcançar melhores respostas. Esses três métodos foram implementados e testados, apresentando resultados bastante satisfatórios.

Palavras-chave: Radar Meteorológico; Vento; Designação.

Abstract

Wind is the movement of air caused by the difference of atmospheric pressure. The wind speed can be measured by instruments called anemometers and estimated by using weather radar and other remote sensing sensors. Measuring the wind speed is important for many areas, both for meteorology and alerts for thunderstorms. The problem to be solved in this paper is to implement methods of recovering the wind and to present a new methodology. The correlation methods use two or three consecutive radar data. They are based on the assumption that, in a short period of time, there is a conservation of the system, so it is possible to monitor the system and find the wind direction. The variational methods use the geometry of the radar for determining the wind field. These methods are interesting because they are fast running. These methods were chosen as objects of study. We will present here a variation of the correlation method. A linear programming problem will be inserted in the correlation method as an attempt to get better answers. These three methods were implemented and tested, with satisfactory results.

Key-words: Weather Radar; Wind; Designation.

1 Introdução

A previsão de tempestades severas em curto prazo (*nowcasting*) é uma importante área da Meteorologia e é utilizada como ferramenta em diversas atividades socioeconômicas. As tempestades se formam em um tempo relativamente curto e, portanto, são necessárias técnicas rápidas e eficientes para detectar tais eventos. Uma das variáveis observadas na previsão é o vento. Entretanto, medir o vento em grandes áreas não é uma tarefa fácil.

O monitoramento do vento é um problema de grande complexidade uma vez que existe uma variabilidade de intensidade e de direção muito grande. É possível medir o vento diretamente com aparelhos chamados anemômetros, contudo são medidas pontuais e a rede destes aparelhos não é densa o bastante para obter-se uma amostragem espacial boa.

Outra maneira de mensurar esta variável é através dos radares meteorológicos Doppler, que usufruem de resolução espacial e temporal boas, entretanto existem restrições nas medições. Os radares conseguem medir apenas a componente radial do vento, chamada de velocidade radial, e apenas onde há refletividade, ou seja, ecos de radar.

Assim, são necessários métodos rápidos e eficientes que possam determinar a intensidade e a direção do vento. Aqui são analisadas algumas técnicas abordadas na literatura e a comparação entre elas. Também é proposta uma nova metodologia da recuperação do campo de vento a partir de dados de radar.

Um dos métodos mais recentes é a *velocity-azimuth processing* (VAP) que consiste em utilizar a geometria do radar meteorológico e dos seus dados para obter a recuperação do vento. Este método foi abordado por (LIANG, 2007; ZHENG; S.LIU; BAI, 2003; ZHOU; STULL, 2005).

Outro método é o *tracking radar echos by correlation* (TREC), que foi originalmente desenvolvido por Rinehart (RINEHART, 1979) e depois estendido por Smythe e Zrnic (SMYTHE; ZRNIC, 1983) e Tuttle e Foote (TUTTLE; FOOTE, 1990). Para estimar

o campo de vento, este método procura padrões de refletividade ou de velocidade radial. Para isso geralmente analisam-se duas imagens consecutivas provenientes do radar. Primeiro calcula-se a correlação, semelhança entre dados quaisquer, de uma parte da primeira imagem, chamado box, na segunda imagem. Onde a correlação for mais expressiva, estima-se que o núcleo se deslocou neste sentido. Isso é possível uma vez que para pequenos intervalos de tempo o sistema se conserva.

O método proposto aqui é uma modificação da técnica TREC, e consiste em fazer o relacionamento ótimo dos boxes maximizando a correlação total através de métodos de programação linear.

Neste novo método é feita uma designação dos boxes, processo bastante usual para problemas de transporte e que encaixa-se perfeitamente ao nosso problema. O método de designação consiste basicamente em minimizar, ou maximizar se a situação requerer, uma função que descreve o custo, ou distância, sujeito a restrições de origem e de destino. Existe uma vasta literatura sobre programação linear, entre elas (MURTY, 1985; PUCCINI; PIZZOLATO, 1990; GOLDBARG; LUNA,).

Neste trabalho serão apresentados resultados da implementação dos métodos VAP, TREC e a nova metodologia proposta aqui, e também será feita a comparação entre elas.

1.1 Objetivo

Este trabalho tem como objetivo estudar formas para recuperar o campo de vento e então, a partir de métodos existentes na literatura, desenvolver uma nova metodologia com base nos métodos de programação linear. Isto será feito através da modificação em um dos métodos existentes com auxílio de linguagens de programação.

1.1.1 Geral

Este trabalho aborda um problema que é significativamente complexo e como objetivo geral terá a apresentação de uma metodologia para a recuperação do campo de vento.

1.1.2 Específicos

Como objetivos específicos citam-se:

- (i) Revisão bibliográfica das obras relacionadas à recuperação do campo de vento;
- (ii) Estudo das diferentes técnicas de recuperação de vento;
- (iii) Implementação das técnicas utilizando a linguagem de programação Python;
- (iv) Estudo de casos reais para a comparação entre as metodologias.

1.2 Limitações do Trabalho

A recuperação do campo de vento é bastante complexa devido à sua grande variabilidade espacial e temporal. Os meios de medição do vento, apesar de muito evoluídos, ainda não tornam indispensáveis a construção de algoritmos para melhorar suas respostas. Tudo isso impede que as respostas dos métodos se tornem mais precisas.

1.3 Estrutura

Este trabalho apresenta mais 5 capítulos além desse.

A seguir será abordado o problema de recuperação do campo de vento. Será apresentado o radar meteorológico, principal instrumento de medição do vento, e a componente radial do vento que é medida pelo radar. Também é apresentada uma breve história dos métodos de recuperação do vento.

O capítulo quatro destina-se à revisão bibliográfica dos métodos existentes para a recuperação do vento. São dispostos em três grandes grupos: os métodos adjuntos, os métodos de correlação, e os métodos analíticos. Terão destaque especial o método TREC de correlação e o método VAP analítico.

A nova metodologia encontra-se no capítulo cinco. Antes de ser introduzida a nova metodologia, será feita uma breve revisão do Problema de Programação Linear (PPL), do método Simplex de resolução e do método Branch-and-Bound para resolução de problemas com variáveis inteiras. Então é sugerida a nova metodologia com a combinação de PPL com um método visto anteriormente.

No capítulo quatro serão descritos os processos de implementação dos métodos vistos: TREC, VAP e a nova metodologia. Será vista também uma pequena abordagem sobre a linguagem usada para programar os métodos e o pacote usado para resolver o PPL.

O capítulo cinco apresenta os resultados dos métodos implementados por quatro diferentes dias. Para cada dia é feita uma análise do evento e de como todos os métodos se comportaram.

1.4 A recuperação do vento

A recuperação do campo de vento consiste em determinar a intensidade e direção do vento numa região delimitada. Neste trabalho é considerada apenas a recuperação do campo de vento para tempo real ou de curtíssimo tempo - o método não é de previsão. Os dados de radar contidos nesse trabalho, bem como da rede de anemômetros, são do Instituto Tecnológico SIMEPAR (SIMEPAR, 2011).

A recuperação do campo de vento é uma tarefa importante para diversos setores econômicos. É importante na agricultura na medida em que os ventos fortes podem dificultar o plantio ou a colheita ou mesmo danificar lavouras. Também é importante para órgãos governamentais tais como bombeiros, defesa civil, setores de energia como a COPEL e etc. Bombeiros e defesa civil podem ser alertados de ventos fortes e podem rapidamente tomar decisões evitando acidentes ou estarem já de prontidão para eventualidades. A COPEL pode utilizar estes dados para monitorar as redes de transmissão evitando quedas de energia. Estes dados também podem ser úteis à população como alerta para tempestades severas. O campo de vento por ser usado também nos aeroportos de modo a alimentar dados para os controladores de vôo, uma vez que com a intensidade e a direção do vento, eles podem direcionar melhor as aeronaves.

Assim, os resultados obtidos com a recuperação do campo de vento são muito úteis a diversos setores da sociedade, direta ou indiretamente. Entretanto medir o campo de vento é uma tarefa difícil na medida em que o vento é uma variável com uma enorme variabilidade de intensidade, direção e sentido.

Um dos meios de se medir o vento é através de aparelhos chamados de anemômetros, que tem a capacidade de medir a intensidade e a direção do vento. Estes aparelhos se mostram úteis, pois medem o vento diretamente.

Anemômetro, do grego *anemos* que significa vento, é um instrumento usado para indicar a direção e medir a intensidade o vento. A primeira descrição de que se tem notícia de um anemômetro foi feita em 1450 por Leon Battista Alberti (MIDDLETON, 1969). Em geral existem dois tipos de anemômetros: os de concha e os de hélice. O anemômetro de conchas, Figura 2 é do tipo rotativo, e consiste em três ou mais conchas simétricas formando um ângulo reto com a vertical. Independentemente da direção do vento, o anemômetro de conchas obtém a velocidade do vento a partir da velocidade de rotação das conchas. O anemômetro de hélice também é do tipo rotativo, dotado de um catavento que mantém uma hélice voltada para o vento. Tendo a rotação da hélice, pode-se então determinar a velocidade e também a direção do vento. O anemômetro de hélice é ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Anemômetro de hélice



Fonte: http://en.wikipedia.org/wiki/File:Wind_speed_and_direction_instrument_-_NOAA.jpg, página visitada em 11/08/2010.

Nota: Anemômetro de hélice existente na rede do SIMEPAR.

Figura 2: Anemômetro de concha



Fonte: http://www.tdnet.com.br/meteoro/anemometro_concha.htm, página visitada em 11/08/2010.

A rede de anemômetros do SIMEPAR é do tipo hélice. Existem atualmente 35 estações meteorológicas espalhadas pelo Paraná dotadas de anemômetros. Esta rede visa cobrir uma área do estado do Paraná de 199.314,850km².

A rede de aparelhos é esparsa, podendo-se ter uma lacuna de vários quilômetros entre os aparelhos, uma vez que é inviável manter anemômetros para medições a curtos espaços. Outro fator a se considerar é que estando à 10m do nível do solo, eles estão sujeitos às anomalias do terreno, podendo eventualmente realizar medições equivocadas.

Mesmo que a rede de anemômetros possua uma densidade muito grande, por exemplo, a cada 10km, o vento não poderá ser obtido integralmente devido a sua característica espacial de grande variabilidade. Como exemplo, ocorrendo uma rajada de

vento de 20m/s ocorrendo no Centro Politécnico da UFPR, pode ocorrer um vento fraco, cerca de 3m/s, no centro de Curitiba, distante 3km em linha reta. Isso ocorre porque as rajadas de vento são produzidas por nuvens de tempestades e ocorrem em uma área muito pequena.

Outro meio de se medir o vento é através do radar meteorológico Doppler, que pode prover informações com bastante resolução espacial e temporal, entretanto existem limitações para medir a velocidade e direção do vento, já que o radar mede somente a componente radial do vento. Assim, faz-se necessária uma abordagem mais detalhada do radar.

1.5 Radar

Radar, do inglês *Radio Detection And Ranging* (Detecção e Telemetria Rádio), é um aparelho que permite detectar objetos a grandes distâncias através de ondas de rádio. O primeiro Radar foi construído em 1904, por C. Hülsmeier na Alemanha, mas foi na Segunda Guerra Mundial que esse instrumento foi realmente aperfeiçoado. Era usado para detectar aviões inimigos e assim tomar contramedidas e avisar a população sobre os eventuais ataques. Detalhes da história do radar podem ser encontrados em (BUDERI, 1996). Desde então os radares são utilizados para uma variedade de casos, entre eles a meteorologia. Estes radares meteorológicos são utilizados para monitorar a atmosfera.

Figura 3: Radar de 1944



Fonte: <http://signal150.army.mil/history-radar.html>, página visitada em 16/03/2011.

Nota: Um dos primeiros radares a serem utilizados em 1944 na segunda grande guerra.

O Radar Meteorológico Doppler funciona basicamente como o sistema de navegação de um morcego. O morcego emite um som de alta frequência, que rebate em

um obstáculo e retorna ao morcego. Quanto mais rápido o som retornar, mais perto está o obstáculo; quanto mais demorado, mais distante. Nos radares meteorológicos são emitidas ondas eletromagnéticas que alcançam grandes distâncias. Quando estas ondas atingem um alvo, elas provocam uma ressonância e parte da informação é retornada para o radar. O efeito Doppler, contido no radar, consiste em uma mudança de frequência entre o observador e a fonte, através do efeito Doppler é possível estimar a velocidade de um objeto. Uma descrição completa de radares meteorológicos é feita em (RINEHART, 2004).

O Radar Meteorológico Doppler do SIMEPAR, Figura 4, instalado no município de Teixeira Soares, é um radar Banda S Doppler, com comprimento de onda de 10cm e feixe de abertura de 1 grau, e está em operação desde outubro de 1998. O radar atualmente está configurado em duas tarefas, uma com alcance de 200km e outra de 400km. Para a tarefa de 200km tem-se 14 ângulos de elevações e para a de 400km e 1 elevação, cobrindo assim o estado do Paraná e estados vizinhos. As características técnicas e do sistema de medição e processamento podem ser encontrados em (BENETI; NOZU; SARAIVA, 1998).

Os dados provenientes do radar com raio de 200 km têm 360 azimutes e 800 bins, ou seja, são 360 feixes emitidos pelo radar e cada feixe possui 800 bins, 800 medições, e como o raio da cobertura circular do radar é de 200 km temos uma medição a cada 250m. A resolução do azimute é de 1 grau. Portanto, a matriz de dados em coordenadas polares possui 800 linhas por 360 colunas.

Figura 4: Radar Meteorológico do SIMEPAR



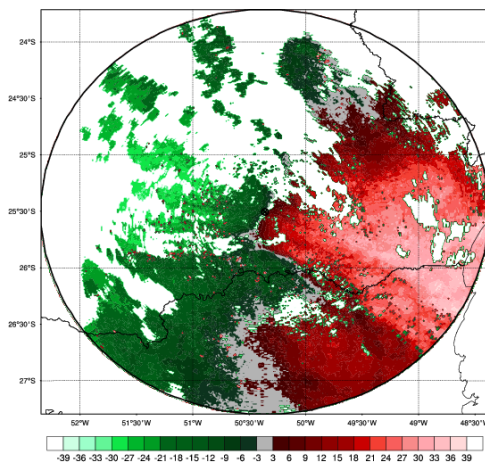
Fonte: SIMEPAR

Nota: Radar Meteorológico do SIMEPAR localizado em Teixeira Soares, município da região Central do Paraná. A antena possui diâmetro de 8 metros.

Os radares Doppler medem três variáveis em coordenadas polares: a velocidade radial, Figura 5, a refletividade, Figura 6, e a largura espectral. A refletividade é relacionada com o aspecto físico das gotas de chuva. A relação entre a taxa de precipitação, o quanto chove em uma hora, e a refletividade, pode ser obtida através da relação ZR proposta em (CHUMCHEAN; SEED, 2006; MARSHALL; PALMER, 1948). A velocidade radial, em metros por segundo, é positiva se o alvo se aproxima do radar e negativa se afasta do radar. A largura espectral, desvio padrão, é uma medida da variabilidade da velocidade radial.

Na imagem 5 a cor verde representa que o vento está se aproximando do radar, que está no centro da imagem, e a cor vermelha que o vento está se afastando do radar. Na imagem 6 estão postos os valores de refletividade: quanto mais alta a refletividade maior é a precipitação.

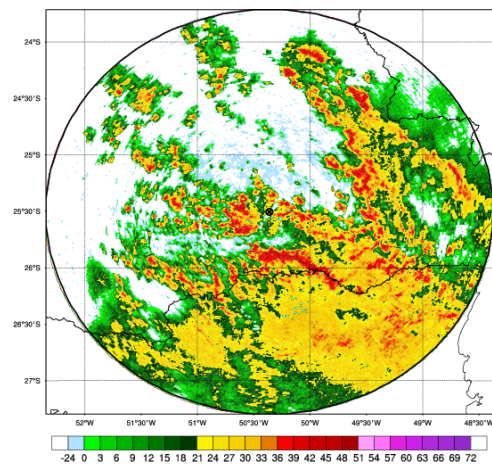
Figura 5: PPI da Velocidade Radial(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 28 de setembro de 2009 às 12 16 UTC.

Figura 6: PPI da Refletividade (Z)



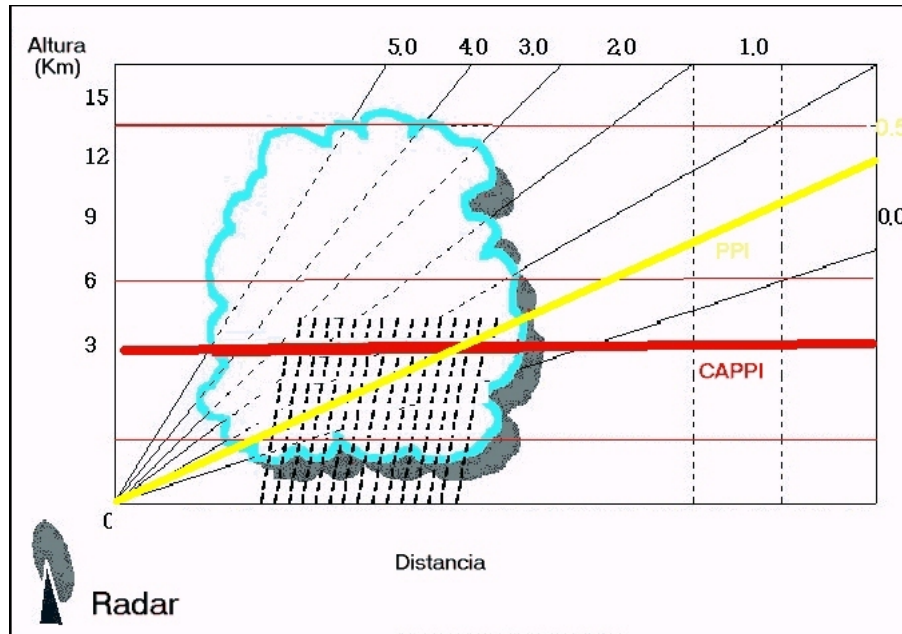
Fonte: O autor

Nota: 28 de setembro de 2009 às 12 16 UTC.

Através das variáveis é possível visualizar as imagens de diferentes maneiras. O PPI, *Plan Position Indicator*, Figura 5, é a projeção no plano horizontal dos dados para um determinado ângulo de elevação. O CAPPI, *Constant Plan Position Indicator*, é a projeção em um plano horizontal constante obtido a partir das elevações. O RHI *Range*

Height Indicator é uma varredura na vertical onde a antena do radar varia apenas em elevação mantendo uma direção fixa.

Figura 7: CAPPI-PPI



Fonte: <http://www.meteored.com/ram/2093/algumas-consideraciones-bsicas-sobre-fal-sos-ecos-detectados-por-los- radares-meteorolgicos>, página visitada em 2/2/2011.

Nota: Comparação CAPPI-PPI.

Na Figura 7 são mostrados o PPI e o CAPPI. No PPI são tomados todos os feixes que o radar meteorológico emite numa mesma elevação. Já o CAPPI é o corte horizontal de vários PPIs.

Estes dados podem ser visualizados em coordenadas polares, que são diretamente provenientes do radar, ou em coordenadas cartesianas, que são os dados oriundos do radar transformados para o sistema cartesiano através de uma interpolação (GHOSH; CHEN, 1983). Os dados originais deste trabalho são em coordenadas polares e transformados para cartesianas através da interpolação de Heymsfield, assim todas as figuras provenientes do radar neste trabalho, bem como as Figuras 6 e 5, estão em coordenadas cartesianas.

Viu-se que apesar dos radares Doppler serem poderosas ferramentas na recuperação do vento, eles infelizmente possuem restrições, medem apenas a componente radial do vento. Assim faz-se necessário o uso de métodos que ajudem a extrair melhores informações do radar.

1.5.1 Velocidade Radial

A velocidade radial medida pelo radar meteorológico deve ser analisada com mais cuidado, pois ela é a principal variável neste trabalho. O radar mede a velocidade do vento a partir da velocidade dos hidrometeoros, que podem ser gotículas ou cristais de gelo presentes na atmosfera.

O radar utiliza o efeito Doppler para mensurar a velocidade radial do vento. O efeito Doppler consiste numa mudança de frequência na onda causada pelo movimento da fonte da onda. Por exemplo, quando uma ambulância se aproxima, o ruído feito por ela aumenta, enquanto que quando se afasta, o ruído diminui. O mesmo princípio se aplica às ondas eletromagnéticas do radar: a partir da mudança da frequência na onda pode-se determinar se o alvo está se afastando ou se aproximando do radar.

Na Imagem 8 a cor verde indica que o vento está se aproximando e a vermelha se distanciando do radar, pelo efeito Doppler. Estas cores são as mais usuais adotadas na literatura. A variação das cores mostra a intensidade do vento, porém próximo do zero não indica necessariamente que o alvo tem uma velocidade próxima de zero.

A velocidade radial difere da velocidade real do vento, como pode ser vista na Figura 9. Como o próprio nome indica, somente a componente radial do vento é captada pelo radar, o que dificulta significativamente a interpretação das componentes do vento.

Na Figura 9 nota-se que as intensidades dos ventos medidas pelo radar são diferentes da realidade, pois ele considera a parte radial do vento.

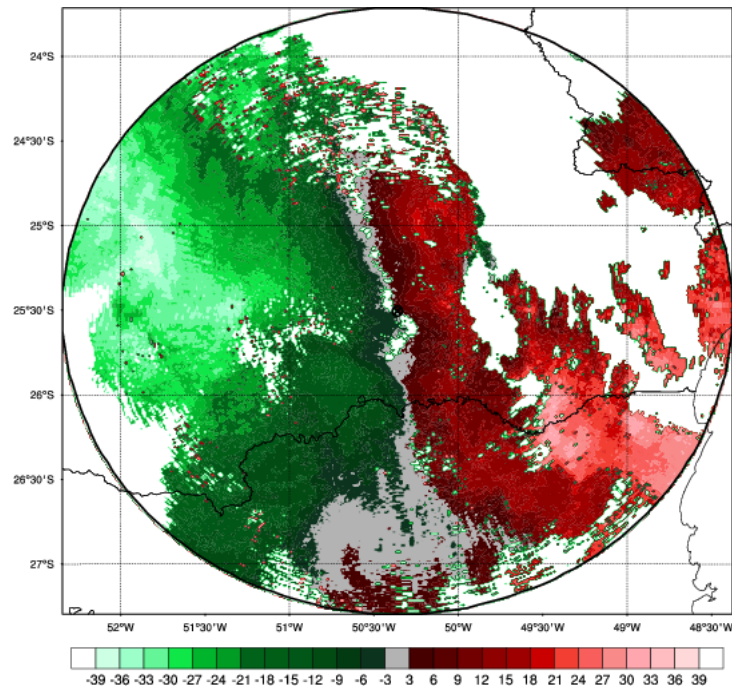
Ou seja, a parte cinza da Figura 8 não necessariamente indica que o vento é próximo de zero. Mostra apenas que o vento está se deslocando perpendicularmente ao radar. Próximo do zero medido pelo radar, o vento poderá estar se deslocando numa mesma distância do radar.

Vê-se então que são obtidas muitas informações sobre o vento através do radar, mas elas são incompletas.

1.6 História da recuperação do campo de vento

Os radares meteorológicos Doppler podem fornecer medidas de vento com alta resolução espacial e temporal, entretanto a principal limitação do radar é que são feitas somente medidas do componente radial do vetor vento. Assim, o alvo que estiver tangente

Figura 8: PPI da Velocidade Radial (m/s)



Fonte: O autor.

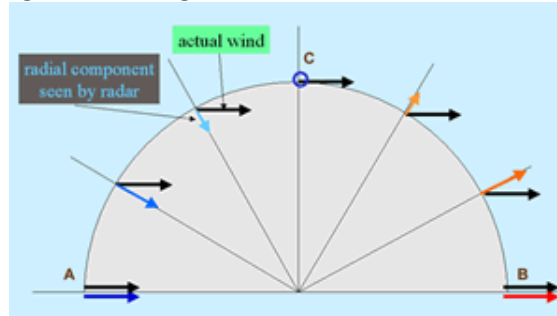
Nota: 8 de setembro de 2009 às 09 22 UTC.

ao feixe eletromagnético propagado pelo radar não será detectado. Desde o início do uso do radar para fins meteorológicos, são estudados meios e métodos para ajudar na recuperação do vento. Aqui serão apresentadas três grandes classes de recuperadores: os métodos adjuntos, os métodos correlacionadores, e os que utilizam a geometria do radar.

Os métodos adjuntos tem sido objeto de intenso estudo nos últimos anos. Estes métodos tem com base encontrar condições iniciais, vento e refletividade, por exemplo, que se aproximem dos dados de radar, e então fazer suas estimativas usando diversas equações. Estes métodos apresentam variações, como pode ser vistas em Sun, (SUN; FLICKER; LILLY, 1991), Sun F., (SUN, 1994), Xu, (XU; QUI, 1994), e Xu, (XU; QUI; YU, 1994).

Uma classe importante de recuperadores de campo de vento são os que correla-

Figura 9: Diagrama ilustrando o vento real.



Fonte: Figura retirada de X, página visitada em 24/03/2011.

Nota: Diagrama ilustrando o vento real e a velocidade radial medida pelo radar meteorológico.

cionam os padrões de vento em duas varreduras consecutivas de radar seguidas. Esta classe foi iniciada por Rinehart, (RINEHART, 1979), e revista por Smithe, (SMYTHE; ZRNIC', 1983), e depois por Tuttle, (TUTTLE; FOOTE, 1990). Estes são bons estimadores, porém existem algumas desvantagens como a perda de resolução espacial, uma vez que se precisa de certo número de pontos para estabelecer-se a correlação.

Existem também os métodos que utilizam como ponto de partida a geometria do radar e alguns conceitos básicos para recuperar o campo de vento. Estes métodos são relativamente recentes. Zheng, (ZHENG; S.LIU; BAI, 2003), apresentaram um estimador que assume a uniformidade local do vento e Zhou, (ZHOU; STULL, 2005), mostram uma variante do método anterior com a vantagem de se obter o campo diretamente e em coordenadas polares. A vantagem destes métodos é a velocidade computacional, contudo são bastante sensíveis aos dados de entrada, ou seja, variações nos dados de entradas oriundos do radar.

Liang, (LIANG, 2007), fez ainda uma tentativa de integrar os dois últimos tipos de recuperadores, tentando aliar a velocidade de execução do último com a qualidade de resultados do anterior. No entanto, como o próprio autor observa, estes resultados são preliminares.

Existem outros métodos para recuperação do campo de vento, como a interpolação dos anemômetros, se houver uma rede densa o bastante. Neste trabalho concentrou-se nos métodos que utilizam o radar meteorológico, uma vez que temos uma grande resolução espacial e temporal.

2 Revisão Bibliográfica

O vento é ar que se desloca provocado pela diferença de pressão atmosférica. A velocidade do vento pode ser medida através de sensores chamados anemômetros, e através de radares meteorológicos, entre outros. A medição da velocidade do vento é importante para diversos ramos da sociedade e é indispensável para os meteorologistas prepararem previsões regionais para as diversas partes interessadas como a agricultura, órgãos governamentais, etc. Além disso, esta recuperação pode auxiliar os modelos numéricos de mesoescala com uma boa inicialização. Assim é grande o esforço para desenvolver técnicas de recuperação do campo de vento.

Entre os métodos mais destacados daqueles que utilizam os radares meteorológicos, estão: os adjuntos, que utilizam modelos numéricos e simulações; métodos que utilizam varreduras consecutivas; e os métodos chamados variacionais, que são mais simples e de baixo custo computacional.

2.1 Métodos Adjuntos

Estes modelos tentam encontrar o campo de vento e suas propriedades termodinâmicas minimizando uma função custo determinada pela diferença entre os modelos numéricos e os dados do radar. A principal vantagem deste tipo de modelo é que se pode tirar o máximo proveito das observações, e a principal desvantagem é o alto custo computacional e, em alguns casos, requerem mais de um radar.

Em (SUN; FLICKER; LILLY, 1991) é usado um modelo dinâmico. Nesse trabalho a função custo é determinada pela diferença entre as soluções do modelo e as observações. O problema proposto é de mínimos quadrados não lineares, resolvido pelo método do gradiente conjugado. Já em (SUN, 1994) há uma generalização para o modelo cartesiano, que tem a vantagem de simplificar o modelo, no entanto existe o custo a mais de se mudar os dados para coordenadas cartesianas.

Em (XU; QUI, 1994) são apresentados três diferentes esquemas que serão usados como restrições no método adjunto. Cada esquema é analisado individualmente e são comparados entre si e entre métodos já existentes. Os testes foram feitos com dados artificiais e os resultados foram dispostos de modo a servirem como base para pesquisas posteriores.

Posteriormente (XU; QUI; YU, 1994) estenderam este método para que fosse utilizado na recuperação dos ventos de baixa altitude.

O trabalho de (TABARY; SCIALOM, 2001) descreve uma modificação no método *velocity-azimuth display* (VAD), para recuperação o campo de vento. Estas modificações foram implementadas e obtiveram resultados semelhantes aos originais, entretanto com um custo computacional significativamente menor. O VAD é uma composição volumétrica das componentes do radar. Logo, obtendo-se apenas um perfil vertical do campo médio de vento.

Estes métodos não foram implementados neste trabalho, optou-se somente pelo seu estudo teórico.

2.2 Métodos de Correlação

Esta classe de métodos usa dois, ou três, dados consecutivos de radar. Eles baseiam-se na hipótese de que em um curto período de tempo existe uma conservação do sistema, assim é possível acompanhar o sistema e encontrar a direção do vento. A principal vantagem destes métodos é que requerem um único radar e seu custo computacional é significativamente menor do que os métodos adjuntos.

O método *tracking radar echos by correlation* (TREC) foi inicialmente desenvolvido por Ronald E. Rinehart em sua tese de doutorado em (RINEHART, 1979). Rinehart faz uma abordagem de como os sistemas se comportam utilizando o radar, além de um estudo das distribuições da refletividade bem como das correlações de tempo e espaço. Ele utiliza como teste o caso de 26 de julho de 1976 em que ocorreu uma série de tempestades no Colorado, E.U.A., e nesses testes o resultado alcançado pelo TREC foi bastante consistente.

O TREC depois foi estendido por Smythe e Zrnic (SMYTHE; ZRNIC, 1983), que encontraram uma boa correlação entre os movimentos do sistema e o campo de vento. Neste trabalho o TREC foi usado em coordenadas polares e testado com diferentes tama-

nhos de boxes, e com estes resultados foram feitas uma série de comparações. Ele afirma que o uso da velocidade radial para determinar o deslocamento do sistema geralmente tem melhores correlações do que a refletividade.

Em (TUTTLE; FOOTE, 1990) Tuttle e Fotte fazem uma longa análise do método de correlação incluindo a quantidade de dados que devem ser observados em cada box e qual o corte de correlação mínima a ser utilizada. Neste trabalho o TREC foi implementado em coordenadas cartesianas e por isso há um acréscimo na análise de correlação.

A seguir a descrição da técnica TREC, como vista em (SMYTHE; ZRNIC', 1983) e implementada neste trabalho.

2.2.1 TREC

Para a utilização do método TREC as matrizes de dados podem estar tanto em formato CAPPI com em formato PPI, e a utilização do método fica mais fácil se forem utilizadas as matrizes em coordenadas cartesianas.

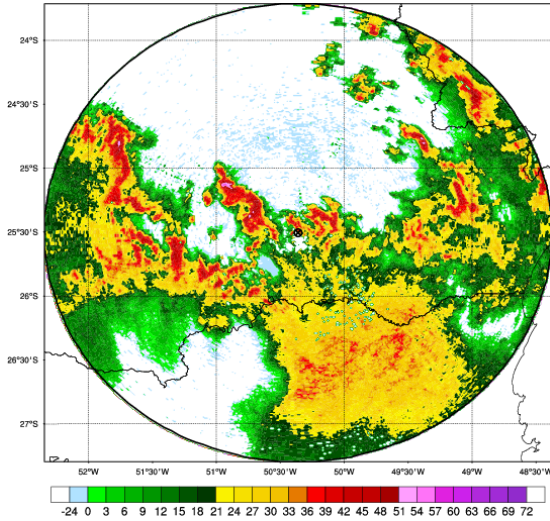
Cada dado de radar é uma matriz de dados georreferenciada com cada elemento tendo valores de refletividade, velocidade radial ou largura espectral, neste caso trabalha-se com a matriz de refletividade ou velocidade radial. Estas matrizes são subdivididas em outras matrizes menores, ou submatrizes, que serão denotadas por boxes. Cada um destes boxes, por sua vez, pode ser transformado em um vetor. A transformação de box para vetor é feita de maneira usual: o primeiro elemento da matriz será o primeiro elemento do vetor, depois completa-se o vetor percorrendo cada linha do box.

Logo cada matriz de dados gera submatrizes que podem ser transformadas em vetores, ou seja, o sistema como um todo é subdividido em partes menores para que depois possa ser feita a comparação destas partes menores de uma matriz de dados com a seguinte.

As Figuras 10 e 11 mostram duas imagens de radar consecutivas espaçadas por aproximadamente 9 minutos. Nota-se que apesar do tempo ter se passado, as características gerais do sistema foram conservadas e que houve um deslocamento no sentido oeste-leste. Essas figuras no método TREC são divididas em partes menores para que possam ser correlacionadas.

Partindo do princípio que o sistema se conserva para pequenas variações no tempo, pode-se associar isto com o fato de o radar meteorológico prover informações em um curto espaço de tempo. Assim que o radar retorna as matrizes, elas são subdi-

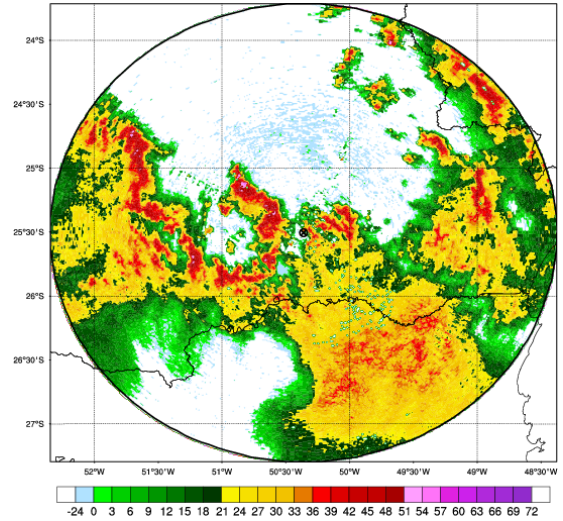
Figura 10: PPI da refletividade (Z)



Fonte: O autor

Nota: 8 de setembro de 2009 às 07 07 UTC.

Figura 11: PPI da Refletividade (Z)



Fonte: O autor

Nota: 8 de setembro de 2009 às 07 16 UTC.

vididas em partes menores, e então são procurados onde o mesmo padrão de dados se encontra na matriz seguinte, com o intuito de descobrir para onde o box se deslocou e portanto para onde o vento fluiu.

Esta procura de padrões de dados de uma matriz na outra pode ser realizada calculando a correlação entre os dados, e onde existir a maior correlação infere-se que o box deslocou-se naquela direção. Aqui se define a correlação do seguinte modo.

Definição 2.1 *A correlação entre duas variáveis aleatórias X e Y padronizadas é chamada de coeficiente de correlação*

$$\rho = E \left[\left(\frac{X - E(X)}{\sigma_x} \right) \left(\frac{Y - E(Y)}{\sigma_y} \right) \right].$$

Onde E é a esperança matemática e σ_x é a variância da variável aleatória x e σ_y é a variância y . Para (JOHNSON; WICHERN, 1998) e (TRIOLA, 1999) a este valor é a medida de relacionamento entre os pares de variáveis avaliadas. Neste trabalho optou-se por utilizar a correlação de Pearson que é definida da seguinte maneira.

Definição 2.2 *Definimos o coeficiente de correlação de Pearson da seguinte forma:*

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}.$$

Em que $COV(X, Y)$ denota a covariância entre as variáveis X e Y e $V(X)$ é a variância da variável X , ou Y .

O coeficiente de correlação de Pearson assume valores entre -1 e 1 . Se $\rho = 1$ dizemos que as variáveis são perfeitamente correlacionadas, caso $\rho = -1$ as variáveis são inversamente proporcionais, se $\rho = 0$ então as variáveis podem não ter semelhança alguma, (KACHIGAN, 1986). Foi escolhido o coeficiente de correlação de Pearson porque torna fácil o entendimento se um box é semelhante ao outro ou não - se for perto de 1 é semelhante, e quanto mais distante de 1 , menos semelhante é.

Em (SMYTHE; ZRNIC', 1983) é dito que somente as correlações acima de 0.25 devem ser consideradas e esse critério foi adotado depois de vários testes. Os valores abaixo de 0.25 indicam uma correlação muito baixa e assim não se pode ter segurança de que os boxes correlacionados condizem com a realidade do deslocamento.

Entretanto não é necessário correlacionar todos os boxes de uma matriz com a matriz seguinte. Isto se deve ao fato de que o período correspondente das amostras consecutivas o sistema só tem velocidade para se propagar até uma determinada distância. Logo se toma a velocidade radial máxima da matriz de dados e o intervalo de tempo entre as imagens pode-se determinar um raio de ação dos boxes, ou seja,

$$raio = v_{max} * \delta t, \quad (2.1)$$

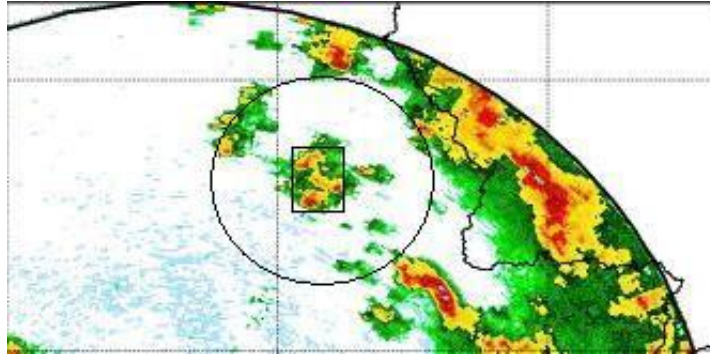
onde v_{max} é a velocidade radial máxima na primeira matriz de dados e δt é o intervalo de tempo entre os dados de radar. Portanto é preciso apenas correlacionar os vetores com os da matriz seguinte que estiverem dentro deste raio.

Isto traz dois benefícios. O primeiro é que como não é necessário correlacionar todos os boxes da matriz, o tempo computacional é acentuadamente reduzido. O segundo benefício é evitar que ocorram correlações altas onde não deveriam existir, visto que seria impossível o sistema se deslocar tão rapidamente em uma direção no período.

Tomando o box e a sua maior correlação na matriz seguinte, que seja maior do que zero, no box da imagem seguinte tem-se para onde o sistema se deslocou e, portanto, para onde se direcionou o vento.

Este método tem a vantagem de necessitar apenas de um radar e ter custo computacional relativamente baixo, e, além disso, as suas premissas básicas fazem dele um método fácil de compreender e eficiente. De maneira objetiva a metodologia TREC fun-

Figura 12: Raio de ação.

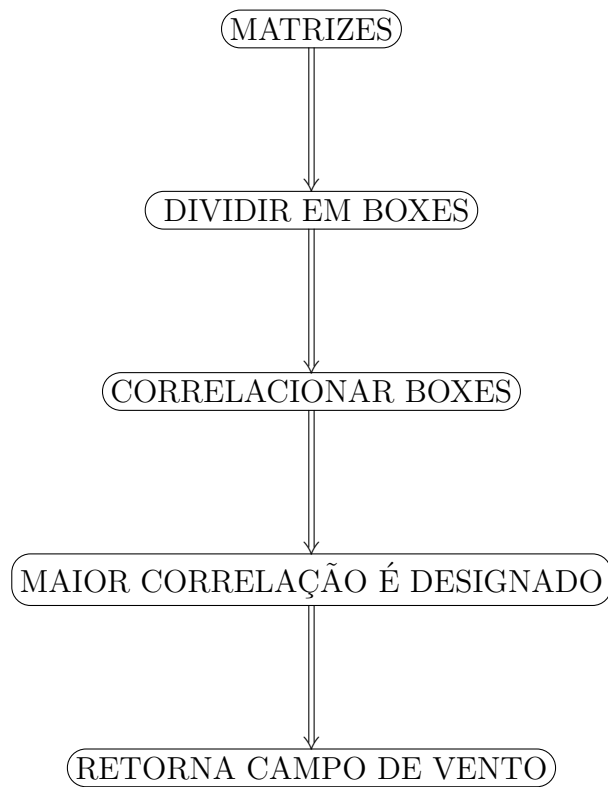


Fonte: O autor

Nota: Ilustração do box com o raio de ação.

ciona do seguinte modo.

Figura 13: Figura com as etapas do método TREC



Fonte: O autor.

2.3 Métodos Analíticos

Esses métodos têm como principal característica a sua simplicidade: os métodos aqui vistos utilizam a geometria do radar para recuperar o campo de vento. A simplicidade do método traz vantagens e desvantagens. Como ponto positivo destaca-se o baixo custo computacional, que torna o método de imensa vantagem uma vez que as imagens de radar são geradas em um curto espaço de tempo, e os resultados do método tem que ser gerados antes da próxima imagem de radar chegar. Por outro lado, devido a estas simplificações, os métodos desta categoria se tornam sensíveis aos dados provenientes do radar.

O método *Velocity-Azimuth Processing* (VAP) apresentado em (ZHENG; S.LIU; BAI, 2003; ZHOU; STULL, 2005), assume a uniformidade local do vento para estimar os vetores do campo de vento, e assim recuperar o campo.

Em (ZHOU; STULL, 2005) os autores fazem algumas considerações para o método proposto. A primeira consideração é que a contribuição do vento vertical, ou do vento que se desloca de cima para baixo e vice-versa, é baixa e, portanto, pode ser desconsiderada. Essa premissa permite que se trabalhe somente com as componentes horizontais do vento, simplificando assim as equações. Outra consideração é da uniformidade local do vento, ou seja, a variação do vento em um pequeno espaço é pequena. Devido a estas considerações e a relações geométricas simples, resulta um método simples e de baixíssimo custo computacional. Por outro lado o método é sensível ao eco de terreno, válido somente para baixas elevações do radar.

Em (LIANG, 2007) é proposto um método que integra os métodos VAD, VAP e *Uniform-Wind* (UW). Este novo método obtém um bom estimador, entretanto o autor observa que mais testes devem ser feitos.

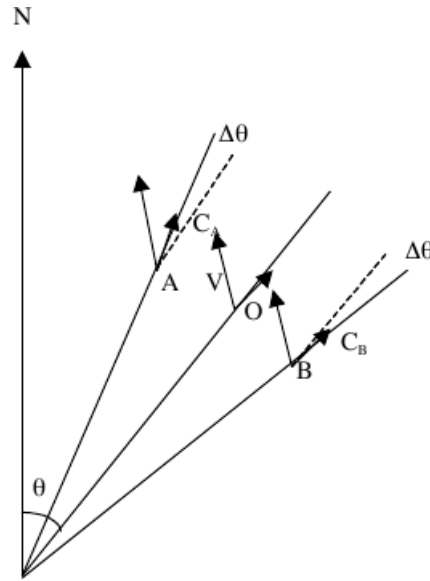
Neste trabalho abordou-se o método VAP de (ZHOU; STULL, 2005), por ser um método de fácil entendimento e relativamente novo na literatura.

2.3.1 VAP

O método *velocity-azimuth processing* (VAP) trabalha inicialmente com dados de radar no formato PPI com coordenadas polares.

O método VAP estima as componentes do vento assumindo a uniformidade local do vento e que a contribuição do vento vertical é praticamente zero para baixas elevações do radar, (LIANG, 2007; ZHENG; S.LIU; BAI, 2003; ZHOU; STULL, 2005).

Figura 14: Representação de três feixes do radar.



Fonte: Figura retirada de (ZHOU; STULL, 2005).

Nota: Representação de três feixes do radar (A, B, O) e seus respectivos azimutes. O vértice corresponde à localização do radar. Assume-se uniformidade do escoamento para cada varredura.

Na Figura 14 tem-se três feixes seguidos do radar e três pontos A , O e B , esses pontos são equidistantes do radar e consideram-se com vento uniforme. Logo, nestes três feixes consecutivos o vento tem o mesmo valor. Denota-se como θ o ângulo que o feixe O faz com o norte. Através de uma simples relação geométrica pode-se encontrar o valor da velocidade do vento C no ponto O

$$C = u \times \sin(\theta) + v \times \cos(\theta). \quad (2.2)$$

Sejam ϕ , C_A e C_B , respectivamente, a resolução do azimute e as velocidades radiais dos pontos A e B nos azimutes $\theta - \phi$ e $\theta + \phi$, considerando a uniformidade no local podemos expressar C_A e C_B como

$$C_A = u \times \sin(\theta - \phi) + v \times \cos(\theta - \phi) \quad (2.3)$$

e

$$C_B = u \times \sin(\theta + \phi) + v \times \cos(\theta + \phi). \quad (2.4)$$

Como temos a uniformidade local do vento, as componentes u e v do vento podem ser consideradas as mesmas para C_A , C_B e C . Tendo em vista que u e v são os mesmo para os três feixes pode-se isolar u e v em termos de C_A , C_B e dos ângulos envolvidos.

Proposição 2.3 *Sejam C_A e C_B da forma (2.3) e (2.4) então tem-se que u e v são*

$$u = \frac{C_B \times \cos(\theta - \phi) - C_A \times \cos(\theta + \phi)}{\sin(2\phi)} \quad (2.5)$$

$$v = \frac{C_A \times \sin(\theta + \phi) - C_B \times \sin(\theta - \phi)}{\sin(2\phi)} \quad (2.6)$$

Prova. Primeiro a demonstração para u . Isolando v em (2.3), obtem-se

$$v = \frac{C_A - u \sin(\theta - \phi)}{\cos(\theta - \phi)}. \quad (2.7)$$

Substituindo (2.7) em (2.4)

$$C_B = u \sin(\theta + \phi) + \frac{C_A - u \sin(\theta - \phi)}{\cos(\theta - \phi)} \cos(\theta + \phi)$$

distribuindo $\cos(\theta + \phi)$

$$C_B = u \sin(\theta + \phi) + \frac{C_A \cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)} - \frac{u \sin(\theta - \phi) \cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)}$$

isolando u na parte direita da equação

$$C_B = u \left(\sin(\theta + \phi) - \frac{\sin(\theta - \phi) \cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)} \right) + \frac{C_A \cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)}$$

$$C_B = u \left(\frac{\sin(\theta + \phi) \cos(\theta - \phi) - \sin(\theta - \phi) \cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)} \right) + \frac{C_A \cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)}$$

usando a relação $\sin(x - y) = \sin(x) \cos(y) - \sin(y) \cos(x)$, com $x = \theta + \phi$ e $y = \theta - \phi$, vem que

$$C_B = u \frac{\sin(2\phi)}{\cos(\theta - \phi)} + \frac{C_A \cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)}$$

$$C_B = \frac{u \sin(2\phi) + C_A \cos(\theta + \phi)}{\cos(\theta - \phi)}$$

$$C_B \cos(\theta - \phi) = u \sin(2\phi) + C_A \cos(\theta + \phi)$$

$$u = \frac{C_B \times \cos(\theta - \phi) - C_A \times \cos(\theta + \phi)}{\sin(2\phi)}.$$

Pode-se repetir o mesmo processo para v , entretanto isolando u em (2.3), logo

$$u = \frac{C_A - u \cos(\theta - \phi)}{\sin(\theta - \phi)}. \quad (2.8)$$

Substituindo (2.8) em (2.4)

$$\begin{aligned} C_B &= \frac{C_A - v \cos(\theta - \phi)}{\sin(\theta - \phi)} \sin(\theta + \phi) + v \cos(\theta + \phi) \\ C_B &= \frac{C_A \sin(\theta + \phi)}{\sin(\theta - \phi)} - \frac{v \cos(\theta - \phi) \sin(\theta + \phi)}{\sin(\theta - \phi)} + v \cos(\theta + \phi) \\ C_B &= \frac{C_A \sin(\theta + \phi)}{\sin(\theta - \phi)} - \left(\frac{\cos(\theta + \phi) - \cos(\theta - \phi) \sin(\theta + \phi)}{\sin(\theta - \phi)} \right) \\ C_B &= \frac{C_A \sin(\theta + \phi)}{\sin(\theta - \phi)} - \left(\frac{\cos(\theta + \phi) \sin(\theta - \phi) - \cos(\theta - \phi) \sin(\theta + \phi)}{\sin(\theta - \phi)} \right) \\ C_B &= \frac{C_A \sin(\theta + \phi)}{\sin(\theta - \phi)} - \frac{v \sin(2\phi)}{\sin(\theta - \phi)} \\ C_B &= \frac{C_A \sin(\theta + \phi) + v \sin(2\phi)}{\sin(\theta - \phi)} \\ C_B \sin(\theta - \phi) &= C_A \sin(\theta + \phi) + v \sin(2\phi) \\ u &= \frac{C_A \times \sin(\theta + \phi) - C_B \times \sin(\theta - \phi)}{\sin(2\phi)} \end{aligned}$$

Assim tem-se u e v em função de C_A , C_B e dos ângulos envolvidos. Seguindo a hipótese de que o vento é uniforme, retorna-se com os valores alcançados de u e v a a partir da Proposição 2.3 na Equação 2.2, obtendo o valor da intensidade do vento para o ponto O bem com as suas componentes.

Faz-se esse procedimento de calcular u e v pela Proposição 2.3 em todos os feixes e distâncias do radar. Logo, obtém-se a recuperação de maneira simples e direta. Contudo é fácil perceber que qualquer perturbação nos dados causará algum dano no cálculo das componentes do vento. O autor de (ZHOU; STULL, 2005) propõe uma suavização dos dados antes do método ser executado, visando obter dados mais uniformes.

Aqui, no entanto, não foi aplicado qualquer tipo de suavização visto que nos outros métodos também não foram aplicadas suavizações e também porque as variações podem ser rajadas de vento, ou seja, estas suavizações podem retirar dados das rajadas mais fortes de vento.

3 Nova Metodologia

No capítulo anterior foram descritos dois métodos de recuperação do campo de vento. O método TREC, que requer duas imagens de radar consecutivas e tem um custo computacional relativamente baixo se comparado com os métodos adjuntos, e o método VAP, que utiliza a geometria do radar para recuperar o vento com um custo computacional muito menor. Neste capítulo será apresentada uma nova metodologia de recuperação do campo de vento derivada do método TREC.

De maneira simples a nova metodologia é uma modificação do método TREC, com inicialização similar à do método TREC. Tem-se duas imagens de radar consecutivas, subdivididas em boxes do mesmo modo feito com o TREC. A seguir calcula-se o raio de ação dos boxes a correlação do box da primeira imagem com os boxes da segunda imagem. Entretanto não se toma o box de maior correlação para o deslocamento do box: é feita a designação ótima dos boxes visando maximizar a correlação total não só deste box, mas da matriz inteira.

Esta designação é feita através de um problema de programação linear inteira binária. Para isso se faz necessário o entendimento de um problema de programação linear.

3.1 Problema de Programação Linear

Problemas de Programação Linear (PPL) faz parte da Pesquisa Operacional, um ramo da matemática que visa resolver problemas de alocação de recursos, de transportes, entre outros.

A Pesquisa Operacional foi implementada inicialmente na 2^a Guerra Mundial, como um conjunto de medidas para resolver uma grande variedade de problemas, por exemplo o transporte de tropas, alocação de canhões, etc. Após a 2^a Guerra, a Pesquisa Operacional continuou em uso, mas para uso civil. A grande referência na Pesquisa

Operacional foi em 1947 quando G. Dantzig publicou o método simplex para resolver o problema de programação linear. Desde então este é um assunto muito estudado e aplicado em diversos setores da economia com resultados expressivos, (PUCCINI; PIZZOLATO, 1990).

Existe também a programação não linear, cuja principal diferença é que as variáveis são não lineares, o que aumenta o grau de dificuldade da resolução do problema. Felizmente algumas não linearidades podem ser transformadas em lineares sem perda de resultados.

Pode-se definir o problema de programação não linear da seguinte maneira.

$$\begin{aligned} &\text{maximizar} && f(x) \\ &\text{sujeito a} && h(x) = 0 \\ &&& g(x) \leq 0 \\ &&& x \geq 0 \end{aligned} \tag{3.1}$$

com $f : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$, $h : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ e $g : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^p$ lineares.

O conjunto

$$\Omega = \{x \in \mathbb{R}^n \mid h(x) = 0, \quad g(x) \leq 0, x \geq 0\}$$

é denominado região viável. Os problemas reais podem, de alguma maneira, ser expressos da forma 3.1, sejam eles problemas de roteamento de veículos, de produção ou mesmo de designação.

Para este tipo de problema existem dois tipos de maximizadores, o local e o global. Todo maximizador global é local, mas nem todo maximizador local é global.

Definição 3.1 *Um ponto $x^* \in \Omega$ é maximizador global de f , se e somente se, $f(x^*) \geq f(x)$ para todo x em Ω .*

Definição 3.2 *Um ponto $x^* \in \Omega$ é dito maximizador local de f , se e somente se, existe uma vizinhança V de x^* tal que $f(x^*) \geq f(x)$ para todo x em $\Omega \cap V$.*

Neste caso como se trata de um PPL, o conjunto viável é um poliedro convexo e como a função objetivo é linear todo mínimo local é um mínimo global, (PUCCINI; PIZZOLATO, 1990; MURTY, 1985).

Existem casos especiais para o PPL. Quando todas as variáveis x são inteiras, recaímos num subproblema chamado de (PPLI):

$$\begin{array}{ll}
\text{maximizar} & f(x) \\
\text{sujeito a} & h(x) = 0 \\
& g(x) \leq 0 \\
& x \geq 0 \\
& x \text{ inteiro.}
\end{array} \tag{3.2}$$

Se as variáveis além de serem inteiras forem também binárias, então este problema é chamado de Problema de Programação Inteira Binária:

$$\begin{array}{ll}
\text{maximizar} & f(x) \\
\text{sujeito a} & h(x) = 0 \\
& g(x) \leq 0 \\
& x \in \{0, 1\}.
\end{array} \tag{3.3}$$

Este tipo de problema pode ser classificado como NP-hard *non-deterministic polynomial-time hard*, ou seja, pode ser resolvido em tempo polinomial. Para mais informações sobre *NP-hard* vide (GAREY; JOHNSON, 1979).

Quando temos algumas variáveis inteiras e outras contínuas, o problema é chamado de Problema de Programação Mista:

$$\begin{array}{ll}
\text{maximizar} & f(x, y) \\
\text{sujeito a} & h(x, y) = 0 \\
& g(x, y) \leq 0 \\
& y \geq 0 \\
& x \text{ inteiro.}
\end{array} \tag{3.4}$$

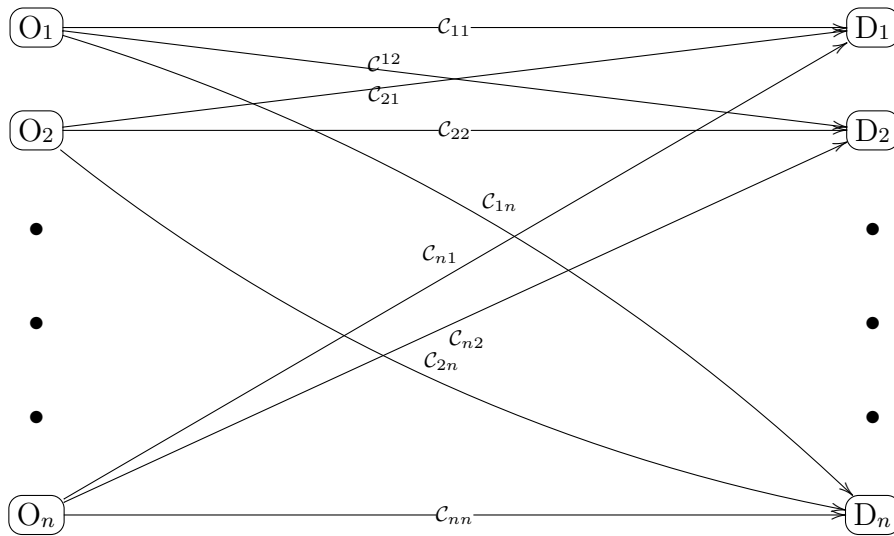
O problema de programação linear na forma padrão é apresentado da seguinte maneira.

$$\begin{array}{ll}
\text{minimizar} & c^t x \\
\text{sujeito a} & Ax = b \\
& x \geq 0
\end{array} \tag{3.5}$$

Neste caso c^t é um vetor de custos e x o vetor de variáveis. A matriz A representa a matriz de coeficiente das restrições e b é o vetor coluna com as informações dos recursos disponíveis, obviamente tem-se que $b \geq 0$. Qualquer problema da forma (3.1) pode, com

algumas modificações, ser expresso da forma (3.5). Aqui será usado de forma indistinta o problema de programação linear na forma (3.1) ou (3.5).

A metodologia aqui apresentada encaixa-se no Problema de Designação que é do tipo Problema de Programação Inteira Binária (3.3). O modelo de designação visa minimizar o custo total de transporte de centros fornecedores (origem) para centros consumidores (destino) sujeitos a restrições de demanda e de oferta. Neste caso o número de centros fornecedores é igual ao de centros consumidores, como no diagrama abaixo.



Em linguagem matemática:

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\
 \text{sujeito a } & \sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \quad j = 1, \dots, n \\
 & \sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \quad i = 1, \dots, n \\
 & x_{ij} \text{ inteiro} \quad i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, n.
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Onde c_{ij} é o custo de transporte da origem i para o destino j e x_{ij} é igual a 1 se a origem i abastece o destino j e 0 caso contrário. O que se procura em (3.6) é minimizar o custo total de transporte $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij}$, sujeito a cada origem fornecendo para um destino $\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1$ e cada destino podendo receber de somente uma origem $\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$. A seguir expõe-se um exemplo de modelagem retirado de (PUCCINI; PIZZOLATO, 1990).

Exemplo 1 *O presidente de uma empresa está estudando a transferência de quatro diretores para quatro locais de trabalho diferentes. O custo de transferência do diretor i para o local de trabalho j é dado por c_{ij} .*

Este exemplo encaixa-se perfeitamente em (3.6), com n igual a 4. Cada diretor só pode ir para um local $\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1$ e cada local só pode receber um diretor $\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1$.

Para esta gama de problemas existem vários pacotes, como o Lingo (SYSTEMS, 2010; SCHRAGE, 2002) e algoritmos, como o Simplex e Branch and Bound (LAND; DOIG, 1960) que os resolvem. O Lingo é um *software* voltado para a construção e resolução de modelos matemáticos de otimização. O simplex é uma técnica desenvolvida por Dantzig em 1947 que resolve o problema de programação linear. O Branch and Bound é uma técnica frequentemente usada para resolver problemas de otimização do tipo *NP-hard*.

Neste trabalho falaremos de maneira geral sobre os algoritmos simplex e Branch and Bound que resolvem a nova metodologia proposta.

3.1.1 Simplex

O problema de programação linear pode ser resolvido pelo método simplex que foi desenvolvido por George Bernard Dantzig em 1947, (DANTZIG, 1963). Apesar de em teoria o método simplex ser no pior caso polinomial, na prática é muito eficiente. Desde essa data outros algoritmos foram desenvolvidos, como o método dos pontos interiores ou o método dos elipsoides, entretanto o método desenvolvido por Dantzig ainda é muito popular.

As principais referências deste capítulo serão Puccini (PUCCINI; PIZZOLATO, 1990) e Murty (MURTY, 1985).

Para o simplex ser aplicado, o PPL deve estar na forma padrão (3.5). Entretanto um problema da forma (3.1) pode ser modificado para a forma (3.5).

No caso de existirem restrições de desigualdade, como

$$x \geq b,$$

acrescentar-se-á uma variável de folga para obter-se uma restrição da seguinte forma

$$x + y = b.$$

De outra forma pode ser necessária a transformação do modelo:

$$Ax \geq b$$

$$Ax + y = b.$$

Isto é conveniente na medida em que se tem uma solução inicial óbvia, que é zerar as variáveis originais. Nota-se que as variáveis adicionais ainda respeitam a restrição de $y \geq 0$.

Assim como as restrições de menor ou igual, também podem aparecer restrições de maior ou igual

$$x \leq b,$$

para este caso introduz-se uma variável de excesso, tornando a restrição de igualdade

$$x - y = b.$$

Esta variável de excesso é condizente com o problema uma vez que também é maior do que ou igual à zero $y \geq 0$.

Outro empecilho que pode ocorrer é na hora da modelagem do problema a variável não ter restrição associada à ela, o que pode ser facilmente contornado com o auxílio de duas outras variáveis substituindo a variável sem restrição

$$x = x_1 - x_2$$

em que $x_1 \geq 0$ e $x_2 \geq 0$.

Para o caso em que a variável é negativa, $x \leq 0$, basta multiplicar os dois lados da inequação por -1 obtendo $x \geq 0$.

Quando o problema for de maximização, pode-se transformá-lo multiplicando função objetivo por -1

$$\begin{aligned} &\text{maximizar} && c^t x \\ &\text{minimizar} && -c^t x. \end{aligned}$$

Os problemas de minimização e de maximização são equivalentes.

Existem teoremas que provam que uma solução do PPL é um ponto extremo do conjunto de soluções, (PUCCINI; PIZZOLATO, 1990; MURTY, 1985). O que o método simplex faz é percorrer os pontos extremos do conjunto testando-os para verificar qual

é o melhor. O simplex, no entanto, não testa todos os pontos do poliedro: ele parte de uma solução básica factível e verifica se os pontos adjacentes a essa solução tem um valor melhor para a função objetivo. Caso exista ele passa para esse ponto e testa novamente os pontos adjacentes. Quando não existir mais pontos com melhorias na função, então o ponto encontrado representa a solução ótima.

Os teoremas, que podem ser verificados em (MURTY, 1985; PUCCINI; PIZZOLATO, 1990), garantem a validade do simplex. Como dito anteriormente, esse problema no pior caso pode ser polinomial.

O método simplex é composto dos seguintes passos:

- (i) Achar uma solução factível básica inicial;
- (ii) Verificar se a solução atual é ótima. Se for, pare. Caso contrário:
- (iii) Determinar a variável não básica que deve entrar na base;
- (iv) Determinar a variável básica que deve sair da base;
- (v) Achar a nova solução factível básica e voltar ao passo *ii*.

O método simplex retorna, quando possível, uma solução para o problema. Entretanto estas soluções podem não ser variáveis inteiras e isto se torna um problema, pois o problema de designação necessita de respostas com variáveis inteiras. Apesar de parecer intuitivo, só arredondar as variáveis não obtém a solução ótima.

Alguns métodos podem ser encontrados para resolver isso com as respostas provenientes do simplex, e entre eles destaca-se o *Branch-and-Bound* que será abordado a seguir.

3.1.2 *Branch-and-Bound*

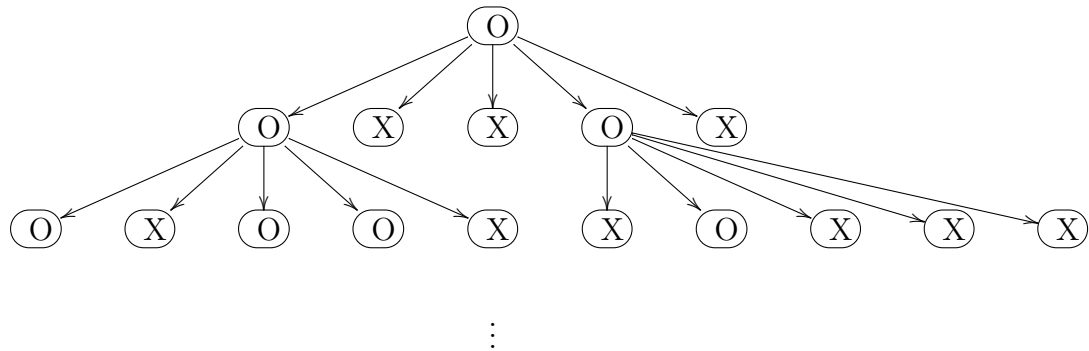
O método *Branch-and-Bound* foi proposto em 1960 por Land e Doig, (LAND; DOIG, 1960). É um método de otimização destinado a encontrar soluções de problemas combinatórios difíceis. De certa forma é um melhoramento do processo de busca exaustiva, que tem como objetivo verificar todas as respostas possíveis. Este método e suas variantes vem sendo largamente utilizados em problemas de programação linear inteira.

Usando a tática do "dividir e conquistar", o *Branch-and-Bound* procura dividir o problema inicial em subproblemas menores visando simplificar sua resolução. O método percorre o espaço de soluções através da enumeração em árvore. A utilização dos processos

torna-se ainda mais vantajosa quando se utiliza o processamento paralelo disponível nos computadores de vários núcleos que hoje existem, agilizando a resolução do problema.

A cada passo do *Branch-and-Bound* uma nova solução é construída e testada. Se esta solução apresentar bons resultados, a árvore proveniente desta solução é desenvolvida, caso contrário essa árvore de soluções é interrompida. O diagrama a seguir ilustra o desenvolvimento desta árvore de soluções.

Figura 15: Figura da árvore de soluções do Branch and Bound



Fonte: O autor.

Nota: O X representa um ramo da árvore que não será desenvolvido e O representa os ramos que serão desenvolvidos.

A descrição do algoritmo do *Branch-and-Bound* é feita a seguir de acordo com Land e Doig, (LAND; DOIG, 1960), Silva, (SILVA, 2002) e Nichetti, (NICHETTI, 2009), com o problema na forma padrão:

- (i) Calcular a solução ótima do problema desconsiderando a condição de integralidade. Caso a solução seja factível com o PPLI, a solução encontrada é ótima e deve-se parar. Caso contrário, deve-se estabelecer um limite inferior finito para o valor da função objetivo igual ao valor desta num ponto factível para o PPLI. Caso isto não seja possível, deve-se adotar o limite inferior com $-\infty$;
- (ii) *Branch*: Selecionar um dos subespaços ainda não avaliados e sem solução contínua factível para, dentro deste subespaço, selecionar uma variável com valor não inteiro. Para esta variável, estabelecer duas novas restrições utilizando funções ditas de parte inteira: uma em que a variável é menor o igual ao seu limite superior (menor inteiro maior que a variável) e outra em que ela é maior ou igual ao seu limite inferior (maior inteiro menor ou igual à própria variável). Assim ficam estabelecidos novos subproblemas, e devem-se enumerar as possibilidades de soluções deles através de uma árvore e enumeração;

- (iii) *Bound*: Calcular a solução ótima destes subproblemas desconsiderando novamente a condição de integralidade e usando como valor da função objetivo o valor máximo em cada subespaço;
- (iv) Partindo do princípio que toda solução com valor da função objetivo menor ou igual ao limite inferior atual não pode tornar-se uma solução ótima, já que não pode gerar soluções com melhor valor para a função, deve-se eliminá-las de futura análise, juntamente com as soluções que não podem gerar soluções factíveis inteiras (não factíveis em ambiente contínuo);
- (v) Adotar como novo limite inferior o maior valor possível entre as soluções factíveis para o PPLI;
- (vi) Caso ainda haja problemas possíveis de serem particionados, retornar ao passo 2, e caso ainda haja soluções passíveis de avaliação, repetir os passos 3 e 4 para todas elas. Caso contrário parar.

Um ponto importante para o *Branch-and-Bound* é a profundidade da árvore de decisão, que influencia diretamente o tempo de execução do algoritmo visto que quanto mais a árvore é expandida, mais tempo de processamento é requerido.

Pode-se utilizar para o desdobramento da árvore três tipos de estratégia: a busca em profundidade, a busca em largura e a busca pelo melhor.

A busca em profundidade visa expandir todo um ramo da árvore de decisão. Esse ramo é expandido até o limite, depois se retorna ao nível acima e se expande um novo ramo da mesma forma. A busca em largura tem o intuito de analisar todas as respostas em um mesmo nível para depois seguir com a construção da árvore. Na busca pelo melhor são expandidos primeiramente os ramos da árvore em que existem as melhores soluções para depois analisar os outros ramos.

3.2 Nova Metodologia

Viu-se que na TREC a designação dos boxes é feita somente encontrando o de maior correlação no raio de ação na outra matriz. Aqui se optou por incluir uma etapa a mais em que cada boxe é designado de forma ótima dos boxes. Isto é feito modelando o problema de modo a ficar na forma (3.6). Deve-se, portanto, ter uma função objetivo e restrições no problema.

Primeiramente as variáveis devem ser definidas. Como visto anteriormente, não é necessário correlacionar todos os boxes da matriz com a matriz seguinte, mas apenas aqueles no raio de ação. Cada box da matriz é associado a um índice variando de 1 até o último box e um segundo índice que corresponde à relação deste box com os boxes da segunda matriz. Por exemplo x_{ij} é o i -ésimo box da matriz inicial que se relaciona com o j -ésimo box da matriz seguinte. Essas variáveis devem receber 1 se o box i da primeira matriz se correlaciona com o box j da matriz seguinte e 0 caso contrário. Da mesma forma são montadas as correlações dos boxes entre matrizes, c_{ij} é a correlação entre o i -ésimo box da matriz inicial com o j -ésimo box da matriz seguinte.

A função objetivo é montada multiplicando as correlações, c_{ij} , entre os boxes pelas suas variáveis x_{ij} , mas somente dos boxes que se correlacionam. Denotando-se por U_i o conjunto dos índices na matriz seguinte que se relacionam com o box i na primeira matriz e n o número total de boxes em uma matriz, pode-se construir a função objetiva da seguinte maneira:

$$F.O. = \sum_{i=1}^n \sum_{j \in U_i} c_{ij} x_{ij}.$$

As restrições desse problema são de dois tipos: as restrições de saída e de chegada. Nas restrições de saída tem-se que o box da primeira matriz só pode se relacionar com um box da matriz seguinte. Nas restrições de chegada tem-se que o box da matriz seguinte só se relaciona com um box da primeira matriz.

As variáveis x_{ij} são sempre 0 ou 1 e chamando de V_j o conjunto de índices de i da primeira matriz que se relacionam com o box j na segunda matriz, as restrições de saída ficam da seguinte forma:

$$\sum_{i \in V_j} x_{ij} = 1; \quad \forall j = 1, \dots, n.$$

Desta maneira, com o somatório variando em V_j , e como as variáveis x_{ij} são sempre 0 ou 1, uma delas obrigatoriamente será 1. Se todas fossem 0 isso quebraria a restrição e se tivesse mais que uma com 1 isso também quebraria a restrição. Também não poderia existir uma variável com valor entre 0 e 1 pois as variáveis tem que ser 0 ou 1.

De maneira análoga pode-se montar as restrições de chegada:

$$\sum_{j \in U_i} x_{ij} = 1; \forall i = 1, \dots, n.$$

Nesse caso o somatório atuando em j impede que o j -ésimo box da matriz seguinte relacione-se com mais de um da matriz anterior.

As restrições sobre as variáveis são simples, x_{ij} devem ser binárias.

Após o PPLI ser montado, ele deve ser resolvido. As respostas do modelo retornam valores para as variáveis x_{ij} que são 0 ou 1. Como se tem um índice associado a cada matriz e cada box, pode-se então recuperar qual box se relaciona com qual box da matriz seguinte.

Tendo em vista que já se sabe para qual box o vento se deslocou na matriz seguinte, a componente u do vento é calculada da seguinte maneira

$$u = \frac{\textit{quantidade de Km deslocados na horizontal}}{\textit{tempo entre as imagens}}$$

e de mesmo modo para v tem-se

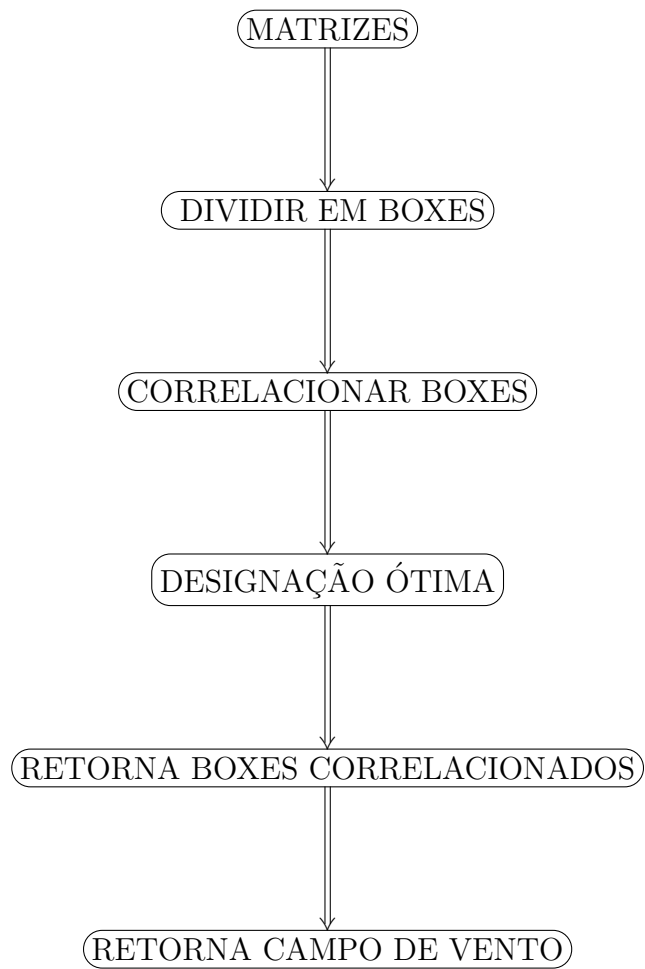
$$v = \frac{\textit{quantidade de Km deslocados na vertical}}{\textit{tempo entre as imagens}}.$$

A intensidade do vento vem de teorema de Pitágoras:

$$C = \sqrt{((u)^2 + (v)^2)}.$$

A partir desses procedimentos a matriz de recuperação do campo de vento pode ser construída analogamente a metodologia TREC tem-se a seguinte estrutura. Mostrado na Figura (??)

Figura 16: Figura com as etapas da nova metodologia



Fonte: O autor.

4 Implementação

Neste capítulo será apresentado como foram implementados os métodos descritos VAP, TREC e a nova metodologia proposta.

Para a implementação dos métodos, foi utilizada a linguagem de programação Python e para a resolução do problema de designação foi utilizado o software Lingo. Como estas duas linguagens são importantes para a implementação, serão feitas explicações sobre elas.

4.1 Sobre o *Python* e Lingo

Uma linguagem de programação é um modo de expressar ordens ao computador: é através dela que o usuário se comunica com o computador. Cada linguagem de programação tem um nível diferente. Uma linguagem de baixo nível fornece ordens diretamente ao *hardware* do computador, tendo maior acesso às partes físicas do computador. Já as linguagens de alto nível tem um grau de abstração maior e não estão diretamente ligadas à arquitetura do computador - nesse nível o acesso às partes físicas do computador não é tão importante. Uma história das linguagens de programação pode ser encontrada em (CONFERENCE; WEXELBLAT, 1981)

Basicamente o usuário escreve um código que é interpretado pelo computador e então executa as informações ali contidas. Algumas linguagens de programação são orientadas, ou modeladas, ao objeto, isto é, existe uma interação entre diversas partes do programa.

Existe um universo muito grande de linguagens de programação, cada uma voltada a um nicho específico. Entre as que mais se destacam estão: C, Java, C++, Visual Basic, C#, Python, Perl, Delphi, Scala. Foi escolhido *Python* neste trabalho devido à sua simplicidade: apesar de ser uma linguagem robusta, ela é de fácil entendimento e manuseio. Para trabalho com matrizes, esta linguagem mostra-se de grande valia uma vez que

usa alocação dinâmica de maneira simples sem contato com o usuário e, assim, pode-se manipular matrizes de maneira muito cômoda.

Python é uma linguagem de programação de alto nível voltada para a simplicidade no código e orientada ao objeto, e foi inicialmente desenvolvida por Guido van Rossum e é de desenvolvimento comunitário e organizado pela *Python Software Foundation* (FOUNDATION, 2010b). Existem vários livros e apostilas sobre *Python*. Aqui se fez uso de (BEAZLEY, 2009; LUTZ, 2009; MARTELLI; RAVENSCROFT; ASCHER, 2005).

Entre os grandes usuários do *Python* encontram-se o Google, Yahoo Groups, Walt Disney Feature Animation, ABN AMRO Bank, NASA, Nokia, IBM entre outros (FOUNDATION, 2010a). Uma curiosidade é que o sítio da *Central Intelligence Agency* (CIA) é desenvolvido em *Python*, <https://www.cia.gov/>.

Os pacotes existentes no ecossistema *Python* também são de grande ajuda. O *processing*, por exemplo, é um pacote que permite o uso de processamento paralelo e com isso reduz o tempo de processamento de algumas rotinas em cerca de 1/3. Outro pacote muito útil do *Python* é o Pyngl (lê-se Pingle). O Pyngl é um módulo de visualização para mapas e outros tipos de gráficos em 2D. Todas as imagens provenientes do radar feitas nesse trabalho foram desenvolvidas com o Pyngl. Aliando-se essas ferramentas com a facilidade para manipular matrizes torna o *Python* uma ótima ferramenta.

O Lingo não é uma linguagem de programação propriamente dita, como o *Python*, e sim é um software voltado para a resolução de problemas de otimização. O Lingo resolve problemas desde que eles estejam na forma apresentada em 3.1. Uma versão gratuita para estudantes pode ser baixada em (SYSTEMS, 2010).

O Lingo é um software bastante sofisticado que apresenta toda a sorte de métodos matemáticos para resoluções dos problemas de programação linear e não linear. As entradas e saídas são interessantes uma vez que podem ser em arquivos de texto, que o *Python* consegue ler e escrever facilmente. Mais sobre modelagem matemática usando o Lingo pode ser encontrado em (SCHRAGE, 2002).

A integração do Lingo com o *Python* é feita de maneira natural e fácil.

4.2 Implementação VAP

Nesta seção será apresentada a implementação do método VAP conforme visto na Seção 2.3.1. Viu-se que o método VAP utiliza dados de radar em formato PPI e

em coordenadas polares. Na Seção 1.5 foi visto que o radar retorna uma matriz em coordenadas polares de 800 linhas por 360 colunas. As colunas representam os feixes do radar em que a linha 0 está apontada para o norte e a variação é de 1º grau, completando assim as 360 colunas em uma volta completa. Cada um desses feixes tem 800 medições, que são as linhas, e como o raio de alcance do radar é de 200km são feitas medições a cada 250m.

Para aplicar o método VAP são requeridos três feixes consecutivos do radar e três medições válidas numa mesma distância do radar. Diz-se medições válidas aquelas em que existem valores, por exemplo, na Imagem 17 na parte em branco não existem medições pois não há chuva. Os feixes consecutivos serão denotados por $j - 1$, j e $j + 1$ em que para calcular j , usam-se os dados dos feixes $j - 1$ e $j + 1$ para determinar o feixe j .

O ângulo que o feixe de j faz com o norte será chamado de θ , e a resolução do radar é de 1 grau, logo o ângulo que $j - 1$ e $j + 1$ fazem com o norte são respectivamente $\theta - 1$ e $\theta + 1$.

Nas 800 medições feitas, as linhas da matriz, ao longo do feixe j será tomado um ponto qualquer nesse feixe que será chamado de i . Pode-se tomar esse mesmo ponto nos feixes $j - 1$ e $j + 1$, e esses pontos estão equidistantes do centro do radar. Como na Figura 14, nos pontos A , O e B .

Da equação (2.5) pode-se tirar a componente u do vento no feixe j no ponto i da seguinte maneira:

$$u = \frac{\text{matriz}[i][j + 1] \times \cos(\theta - 1) - \text{matriz}[i][j - 1] \times \cos(\theta + 1)}{\sin(2 * 1)}$$

do mesmo modo pela equação (2.6) a componente v

$$v = \frac{\text{matriz}[i][j - 1] \times \sin(\theta + 1) - \text{matriz}[i][j + 1] \times \sin(\theta - 1)}{\sin(2 * 1)}$$

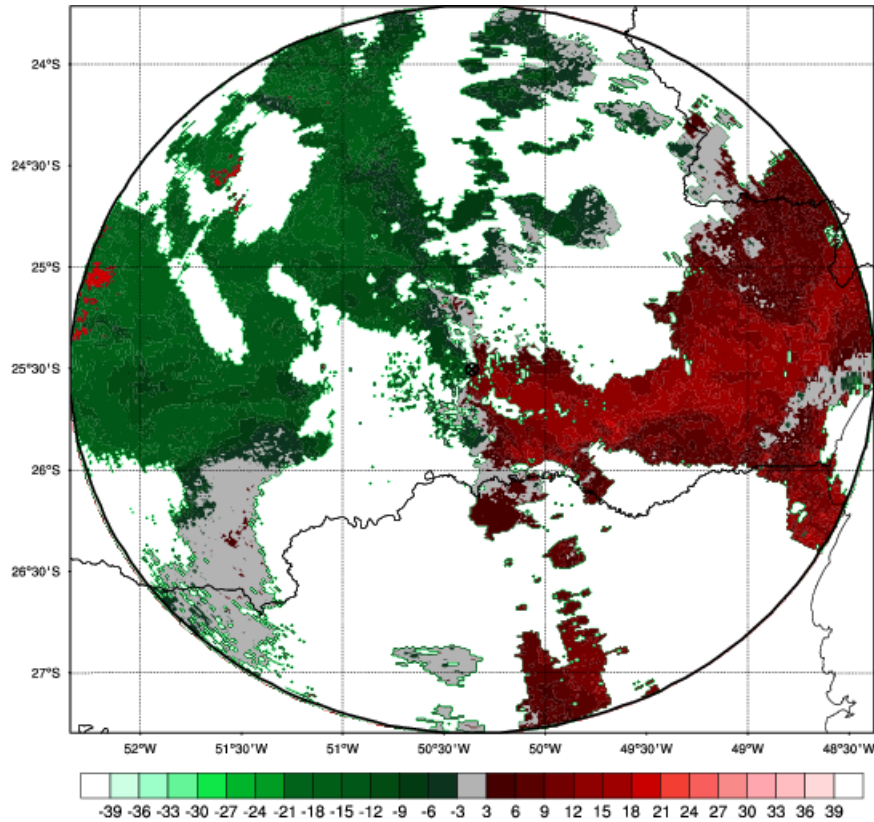
Assim pela equação (2.2) vem que

$$C[i][j] = u \times \sin(\theta) + v \times \cos(\theta).$$

Repete-se esse procedimento para todos os feixes e todos os pontos nos feixes, percorrendo toda a área do radar, em que se denota por C a matriz do vento recuperado.

Entretanto algumas considerações devem ser feitas. Na Figura 17 vê-se que a ma-

Figura 17: PPI da Velocidade Radial(m/s).



Fonte: O autor.

Nota: 13 de Janeiro de 2009 às 13 17 UTC.

triz não está sempre preenchida com dados. Optando-se por determinar as componentes do feixe j no ponto i se existirem dados nos feixes $j - 1$ e $j + 1$ no ponto i , isso independe de existir ou não dados no j no ponto i . Caso não seja possível calcular as componentes do vento, o dado no feixe j no ponto i é dito como faltante.

Outro ponto diz respeito ao feixe 0, que possui um antecessor que é o último feixe. Isto ocorre porque os feixes são dispostos de maneira circular. Portanto o sucessor do último feixe é o primeiro feixe.

Assim ao final deste procedimento tem-se uma matriz do campo de vento recuperado, e salvando a cada interação os componentes u e v , tem-se também as matrizes das componentes do vento. Estas matrizes, no entanto, estão em coordenadas polares. Para transformá-las para cartesianas optou-se por usar o algoritmo de (GHOSH; CHEN, 1983). As dimensões da matriz retornada podem variar, obedecendo à restrição de resolução máxima do radar. As dimensões usuais são de 400x400, ou seja, cada pixel corresponde a 1km².

Por último, com o pacote `Pyngl` do *Python* é plotada a imagem de vento recuperado.

Apesar de seu rápido processamento, o método VAP pode ser incrementado se o computador onde é executado possuir diversos núcleos. É fácil notar que cada linha da matriz de dados original pode ser processada independentemente das outras. Logo através do pacote *processing* do *Python* cada núcleo do computador fica responsável por processar uma linha da matriz, e assim que o núcleo termina, ele passa para a próxima linha não processada.

A melhora proveniente do uso do pacote *processing* é bastante significativa, reduzindo o tempo de processamento em mais de 1/3.

4.3 Implementação TREC

Conforme visto na Seção 2.2.1 o método TREC possui várias etapas: divisão das matrizes em boxes, definição do raio de ação do box, encontrar a maior correlação entre os boxes, e recuperar o campo de vento.

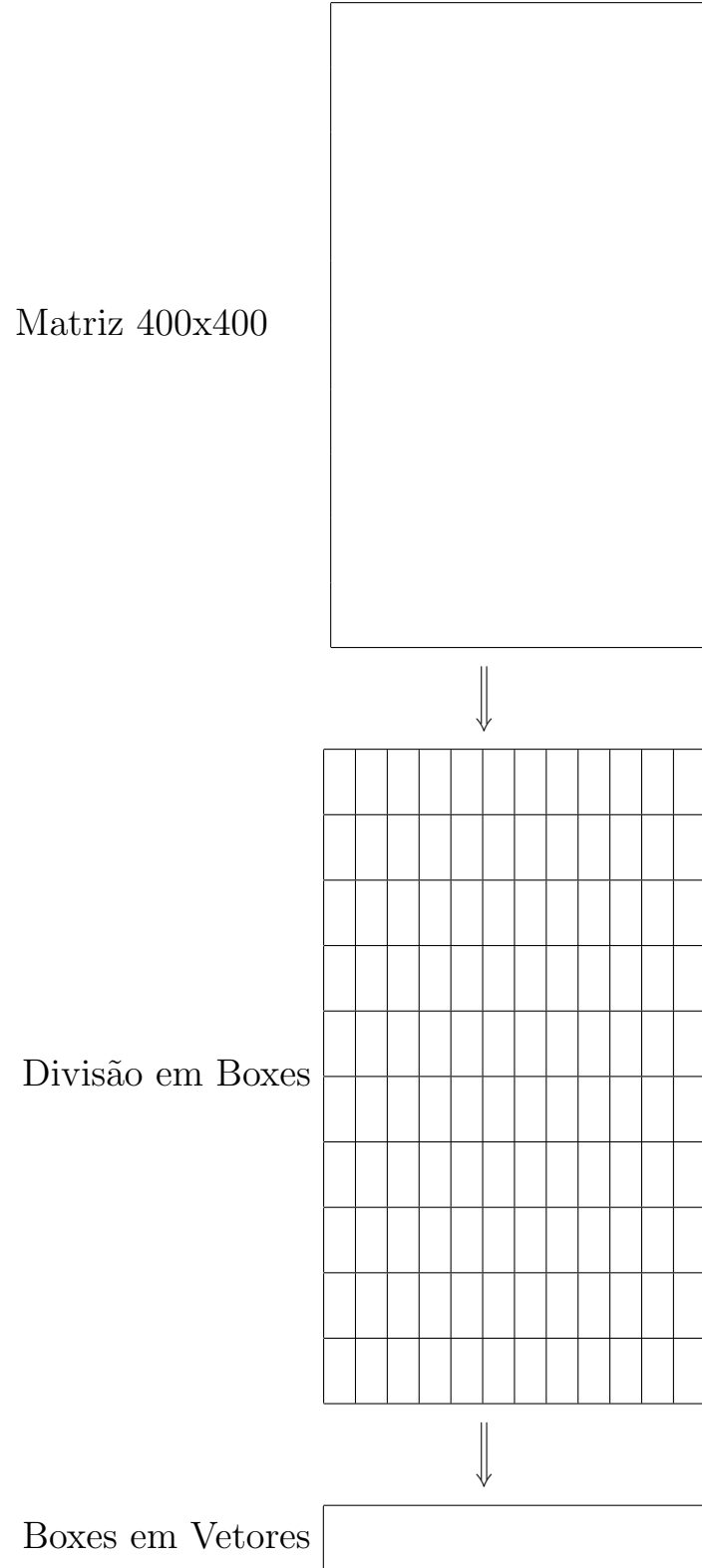
Como se viu que os dados são coletados em coordenadas polares, a primeira etapa é transformá-los para coordenadas cartesianas. Isto é feito através de um algoritmo de mudança de coordenadas de (GHOSH; CHEN, 1983). Depois de aplicado este algoritmo, obtém-se uma matriz em coordenadas cartesianas, que neste caso terá dimensões 400x400, e como o raio do radar é de 200km, cada elemento da matriz representará 1km².

O passo seguinte é escolher o tamanho do box, ou submatriz. Caso for muito pequeno, haverá dificuldade no cálculo da correlação dos boxes, pois a correlação em geral é baixa e logo não pode-se tirar muitas conclusões. Se for muito grande haverá perda de resolução, logo é preciso ter um equilíbrio. Foram realizados testes com boxes variando de 3 a 8 elementos de lado. Os melhores resultados em que tem-se a correlação significativa e não perde-se resolução foram para o tamanho 4. Este tamanho de box está de acordo com o proposto por Tuttle e Fotte, (TUTTLE; FOOTE, 1990), em que boxes menores que este tamanho obtiveram valores baixos no cálculo da correlação, e de tamanho maiores tiveram perda de resolução significativa. Assim a matriz foi dividida em boxes de 4x4, tendo então 100 boxes.

Os boxes foram transformados em vetores de maneira simples: as linhas dos boxes são colocadas em sequência formando um vetor. Ao final desta etapa existem 100 vetores

representando partes da matriz. Isto é feito para as duas matrizes usadas. Na Figura 18 tem-se a ideia básica de como os boxes são divididos e transformados em vetores.

Figura 18: Figura com as conversões da matriz.



Fonte: O autor.

Pode acontecer que quando forem construídos os boxes, eles tenham pixels com dados válidos de radar e dados faltantes de radar. Os dados de radar faltantes são substituídos por zero. Caso todo o box seja de dados faltantes este não é considerado com correlacionável, ou seja, não é válido que o vento se desloque naquela direção.

Cada box da primeira matriz deve ser correlacionado com o da matriz seguinte. Utilizando a definição de correlação de Pearson em 2.2 para este caso fica-se com: onde x é um vetor qualquer com valores de velocidade radial da primeira matriz e y é um vetor qualquer da matriz seguinte.

Entretanto não é necessário percorrer todos os boxes da matriz. Usando a equação (2.1) pode-se encontrar o raio de ação do boxes ou quanto ele poderia ter se deslocado. Isto é feito tomando o maior valor do vento, dado em metros por segundo, na matriz inicial e multiplicando pelo tempo as duas matrizes, assim essa operação retorna o raio de ação dos boxes. A Figura 19 ilustra o raio de ação do box O .

Para determinar quantos boxes deverão ser correlacionados pelo box central, toma-se o valor da Equação (2.1) dividido pela resolução do box. Como escolheu-se um box de 4 pixels e cada pixel tem 1km de lado, então nesse caso fica-se com 4km. Por exemplo, se o raio de ação foi de 23km, e neste trabalho o box é de 4x4 então $23/4 = 5,75$. Logo arredondando para cima temos 6 boxes de ação em torno do box que é o centro.

Cada vetor da matriz foi indexado de maneira a facilitar a recuperação dos resultados e do cálculo do raio de ação. O primeiro box foi indexado como 1, 1 e o segundo como 1, 2 e assim por diante. Seguindo o exemplo, o box (1, 1) da primeira matriz se relacionaria com o (1, 1) até (1, 6) e (6, 1) até (6, 6) da segunda matriz formando um quadrado. No diagrama a seguir o box O possui um raio de ação onde existem X , esses são o boxes na matriz seguinte que deve ser correlacionados com o box O da matriz inicial.

A seguir calcula-se a correlação entre o box e todos os que ele se relaciona na segunda matriz. Onde houver a maior correlação é dito que o box se deslocou naquela direção. No exemplo, se a maior correlação ocorrer no box 2, 4, diríamos que vento foi de (1, 1) para (2, 4). Como os boxes estão indexados referentes à matriz original, fica fácil retornar o resultado do vento.

As componentes u e v podem ser recuperadas sabendo quantos boxes o vento se deslocou na vertical e na horizontal.

Figura 19: Figura do raio de ação do box O

O	X	X																		
X	X	X																		
X	X	X																		

Fonte: O autor.

$$u = \frac{\textit{quantidade de Km deslocados na horizontal}}{\textit{tempo entre as imagens}}$$

$$v = \frac{\textit{quantidade de Km deslocados na vertical}}{\textit{tempo entre as imagens}}.$$

E a intensidade do vento vem de teorema de Pitágoras.

$$C = \sqrt{((u)^2 + (v)^2)}$$

Repete-se esse processo para todos os boxes da matriz. Ao final do processo tem-se para onde cada box se deslocou, e assim recuperando os boxes em matrizes pode-se determinar o deslocamento do vento.

Aqui também é possível utilizar o pacote *processing* do *Python*. O cálculo da correlação entre os boxes da primeira matriz com a segunda é independente, assim o processamento paralelo se faz útil.

4.4 Implementação da Nova Metodologia

Este método, visto na Seção 3.2, tem muita semelhança com o TREC. Inicialmente têm-se os mesmos procedimentos. As matrizes são divididas em boxes - aqui também são usados boxes de 4 pixels de lado - e depois transformadas em vetores, e então é calculado o raio de ação.

Neste ponto é que se difere do método TREC. As correlações calculadas dos boxes de uma matriz à outra são armazenadas e deve-se construir um problema do tipo (3.6). Vale lembrar que as correlações são calculadas da mesma forma que no TREC original.

Primeiro é preciso criar uma indexação que o Lingo conheça. Como há 100 boxes no total, que se pode imaginar com 10 por linha de boxes numa matriz em que cada box tem 4 pixels, somando ao final uma matriz de 400x400. Cada box é dado um número de 1 a 100, onde são consideradas de 1 a 10 na primeira linha, de 11 a 20 na segunda linha e assim por diante. Logo se podem formar os relacionamentos de uma matriz para outra de maneira simples. Os boxes são então transformados em vetores para calcular as correlações.

O Problema (3.6) requer uma função objetivo, restrições de oferta e restrições de demanda, e as variáveis de decisão. As variáveis de decisão serão denominadas x_{ij} , onde i corresponde ao vetor da matriz inicial e j da matriz seguinte, e essas variáveis serão binárias.

Naturalmente só serão inicializadas as variáveis que se correlacionarem, ou seja, aquelas que apresentarem correlação maior que 0,25 e estarem dentro do raio de ação do box. Será denotado por U_i o conjunto de índices em j com os quais um certo i se relaciona, e de maneira análoga V_j é o conjunto de índices em i com os quais um certo j se relaciona. Por sua vez c_{ij} será o valor de correlação da primeira matriz no índice i com a segunda matriz no índice j .

A função objetivo será o somatório de todo os x_{ij} multiplicado pelos c_{ij} . Onde c_{ij} é a correlação do vetor i na primeira matriz com o vetor j da segunda matriz. No formato do Problema (3.6)

$$\begin{aligned}
 \text{Min } Z = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \\
 \text{sujeito a } & \sum_{i \in V_j} x_{ij} = 1 & j = 1, \dots, n \\
 & \sum_{j \in U_i} x_{ij} = 1 & i = 1, \dots, n \\
 & x_{ij} \in 0,1 & i = 1, \dots, n \text{ e } j = 1, \dots, n,
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

onde n é o número de boxes e U_i e V_j estão descritas acima.

Montadas as restrições e a função objetivo, estas são salvas em um arquivo texto em um formato que o Lingo reconhece. É possível ajustar o Lingo para que gere uma saída que seja em um formato texto, assim o *Python* pode ler esse arquivo. Deste modo

a integração *Python*-Lingo se faz de maneira muito prática.

A saída gerada pelo Lingo é uma sequência das variáveis x_{ij} , onde se 1 então o vetor i da primeira matriz se deslocou para o vetor j na segunda matriz, e 0 caso contrário.

Neste ponto o *Python* pode calcular as matrizes das componentes do vento e da intensidade do vento. Cada vetor é indexado na posição da matriz, por exemplo, $x_{1,12}$ está na primeira linha da primeira matriz e foi correlacionado com o vetor 12 na matriz seguinte. Assim pode-se identificar para qual parte da matriz o box se deslocou e o valor das componentes do vento e a intensidade do campo de vento. A seguir serão apresentados os resultados obtidos com os métodos implementados no Capítulo 4. Esses resultados serão apresentados na forma de campo de vetores, representado a direção e o sentido dos ventos. Neste trabalho foram testados 4 casos.

Caso 1: Neste caso foi observada uma rotação ao norte do radar.

Caso 2: Aqui o caso apresenta uma área de chuva com vários buracos.

Caso 3: Para este caso a maior parte dos dados se concentra na borda do radar.

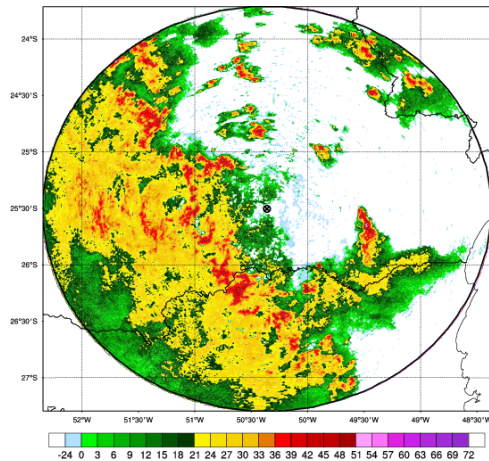
Caso 4: Por último esse caso apresenta várias células isoladas.

4.5 Caso 1

O primeiro caso é do dia 15 de novembro de 2009 começando às 20 31 UTC até 22 31 do mesmo dia, totalizando 17 imagens. Este dia foi escolhido pois representa a formação de uma rotação na parte norte do radar e com intensa precipitação no decorrer do evento.

O evento desse dia começa no sudoeste e vai se deslocando rumo ao nordeste. As Figuras 20 e 21 ilustram o deslocamento. Vê-se claramente que na primeira figura o sistema está na porção sudoeste e na segunda já na porção nordeste do radar. Este primeiro caso é de uma passagem de uma frente fria que provocou bastante chuva sobre o Paraná. Pela imagem é possível observar uma linha convectiva, em vermelho, onde a chuva é mais intensa e ventos mais fortes, e uma área estratiforme, em amarelo, onde a chuva varia de fraca a moderada e os ventos tendem a ser menos intensos.

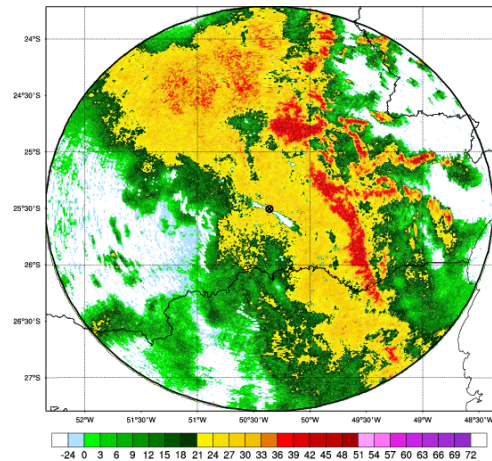
Figura 20: PPI da refletividade (Z)



Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 20 31 UTC.

Figura 21: PPI da Refletividade (Z)

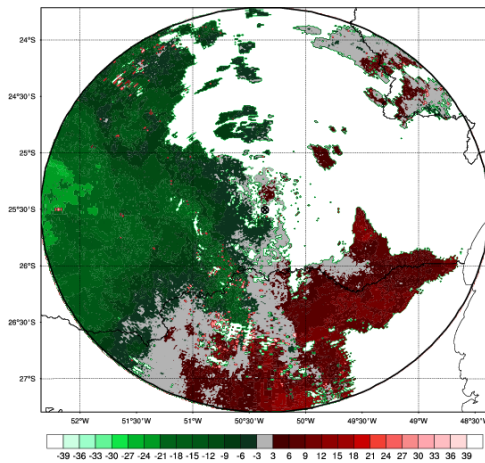


Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 31 UTC.

As Figuras 22 e 23 mostram, no mesmo horário, que as anteriores a velocidade radial captada pelo radar. Como já visto, a parte verde da figura indica que o vento está se aproximando do radar e a vermelha que está se afastando do radar. Enquanto o sistema se desloca no sentido sudoeste-nordeste, o vento está fluindo de noroeste para sudeste. Como o radar toma somente a componente radial do vento, as partes cinza são de valores baixos para a velocidade do vento.

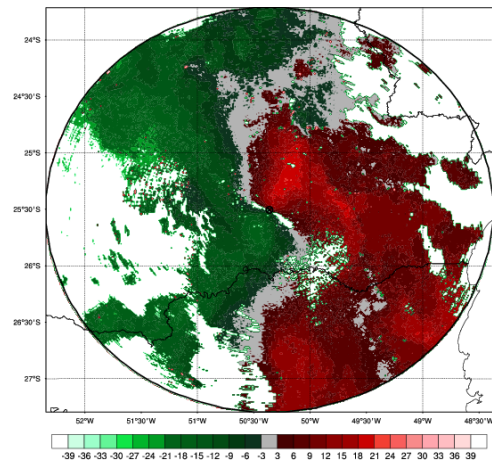
Figura 22: PPI da velocidade radial (m/s)



Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 20 31 UTC.

Figura 23: PPI da velocidade radial(m/s)

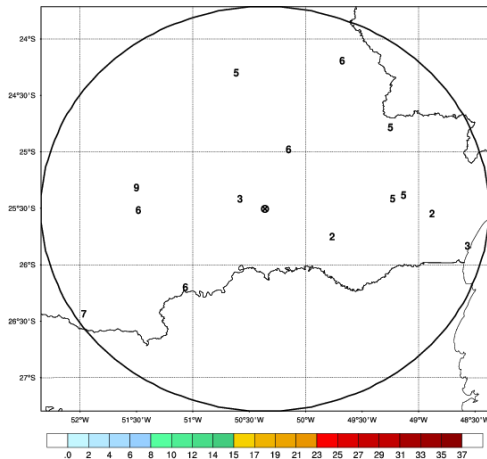


Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 31 UTC.

Isto pode ser verificado graças à rede de anemômetros: nas Figuras 24 e 25 os valores dos anemômetros estão plotados onde eles se localizam. Apesar dos anemômetros estarem a uma altura bem inferior à do radar, a comparação ainda é válida. Mesmo que os dados de radar estejam de 2 a 3 km de altitude, pode-se estimar que o escoamento médio na atmosfera possua uma direção similar entre essa altitude e a superfície, 10m no caso dos anemômetros.

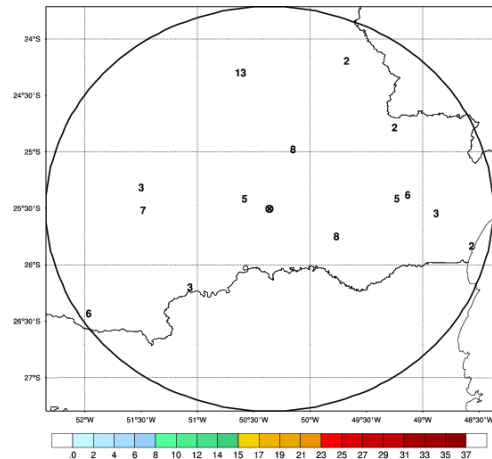
Figura 24: Rede de anemômetros(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 20 30 UTC.

Figura 25: Rede de anemômetros(m/s)

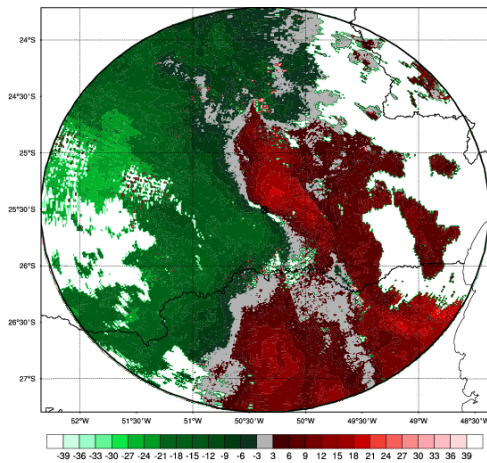


Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 30 UTC.

Uma parte importante desse evento ocorre às 22 07 UTC, em que na Figura 26 observa-se uma rotação do vento na parte norte do radar. Uma porção vermelha, se afastando do radar, faz um bico em direção ao norte do radar e ao lado uma porção verde, se aproximando do radar. Assim naquele ponto uma parte está em direção ao norte e outra, bem ao lado, em direção ao sul provocando assim uma rotação. A Figura 27 ilustra uma linha de intensa precipitação orientada de norte a sudeste.

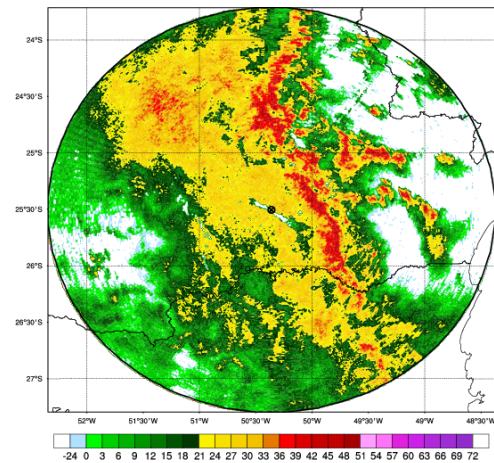
Figura 26: PPI da velocidade radial(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.

Figura 27: PPI da refletividade (Z)



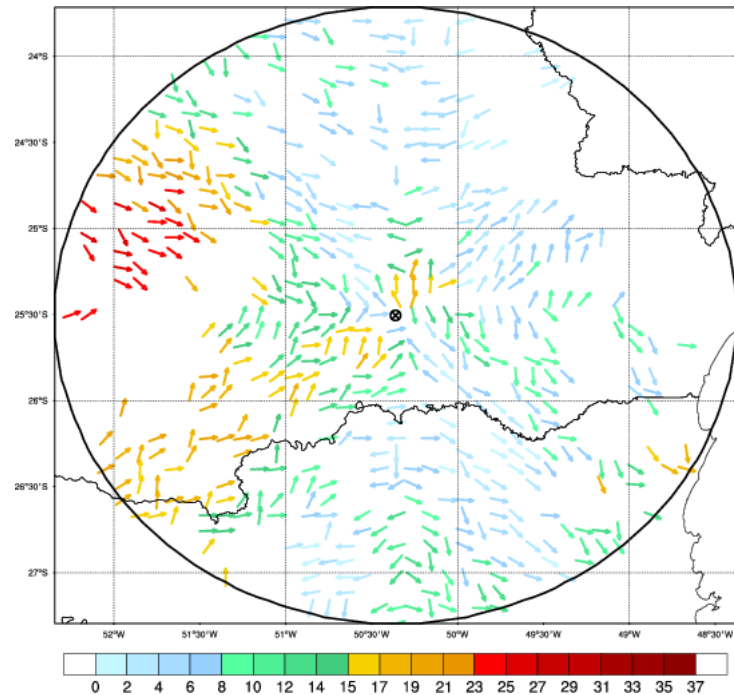
Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.

A utilização de radar meteorológico possibilitou o detalhamento da estrutura do sistema precipitante de modo a capturar áreas de convecção e a circulação no nível da nuvem, o que não tão evidente, por exemplo, com imagens de satélite ou rede esparsa de anemômetros.

Da Figura 26 é observado que o vento está se deslocando de cima para baixo, de noroeste para sudeste. A Figura 28 ilustra o resultado proveniente do método VAP, os vetores apontam para onde o vento está se deslocando naquele ponto e a cor indica a intensidade do vento em termos absolutos.

Figura 28: Resultado do VAP(m/s)



Fonte: O autor

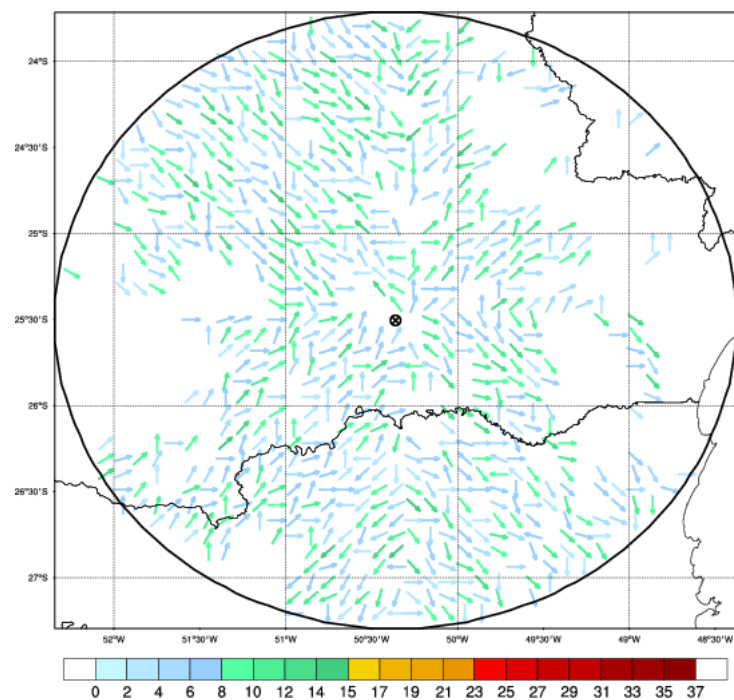
Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.

Vê-se o fluxo proporcionado pelos vetores se dirigindo no sentido noroeste-sudeste e a análise das porções vermelhas e verdes do radar está de acordo com a direção dos vetores. Nota-se que existem vetores faltantes onde existe vento captado pelo radar. As áreas com ausência de vetores são próprias do sistema de medição de vento radial de radar meteorológico Doppler. Como a técnica VAP necessita de três informações de velocidade radial para o cálculo do vetor vento, o mesmo será obtido apenas em áreas detectável pelo sinal do radar. Na parte norte onde deveria haver uma rotação, a visualização desse evento fica prejudicada, pois não existem muitos vetores. Entretanto pode-se notar que os vetores existentes tentam descrever a rotação uma vez que alguns estão no sentido oeste e ao lado destes existem outros no sentido oeste e logo abaixo alguns apontando para cima.

O resultado extraído do método TREC é apresentado na Figura 29. Do mesmo

modo que no VAP, o fluxo se desloca no sentido noroeste-sudeste, mas claramente esta figura apresenta mais vetores. Neste caso a rotação pode ser bem verificada: os vetores ao norte do radar descrevem uma curva para baixo e a seguir se voltam em direção ao oeste para logo apontarem para cima e depois novamente para baixo. Assim fica caracterizada a rotação que foi mais difícil de encontrar usando o VAP. Entretanto, o TREC utilizou um tempo computacional maior do que o VAP, e obteve menores valores para a intensidade do vento, porque o TREC tende a recuperar o vento médio e não a rajada do vento.

Figura 29: Resultado do TREC(m/s)



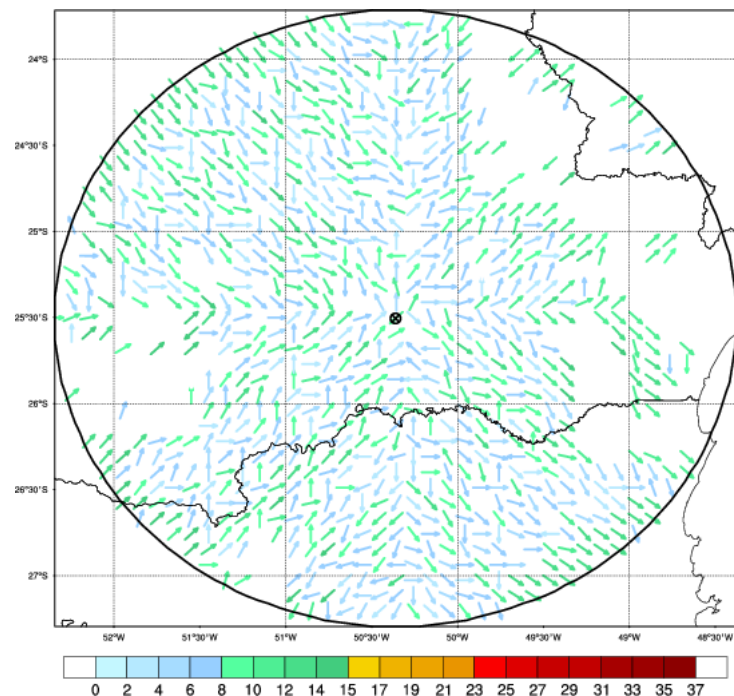
Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.

A nova metodologia, presente na Figura 30, contém muito mais vetores do que o VAP. Ainda assim vê-se que o fluxo do vento se desloca no sentido noroeste para sudeste. A rotação ao norte do radar pode ser verificada ainda mais claramente do que nas outras técnicas: acima do radar os vetores apontam para o norte e um pouco a

noroeste para depois irem para leste e descerem ao sul. Pode-se ver que a nova técnica ainda recuperou o campo para as células nas bordas do radar presentes a leste que foram pouco identificadas no TREC e quase não apareceram no VAP. Assim como o método TREC, a nova metodologia apresenta valores menores de intensidade do vento, pois assim como o TREC ela tende a apresentar o valor médio do deslocamento do vento.

Figura 30: Resultado da nova metodologia(m/s)



Fonte: O autor

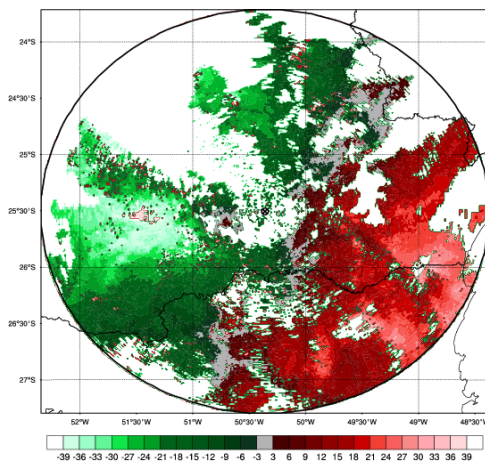
Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.

4.6 Caso 2

Este caso é do dia 8 de Setembro de 2009 começando às 04 01 UTC até 10 31 do mesmo dia, totalizando 51 imagens. Será exposta aqui para análise de resultados a imagem da hora 05 16 UTC. Essa imagem apresenta uma grande conectividade na linha

vermelha de leste a oeste, como ilustrado na Figura 32. Logo ao sul desta linha existe uma grande massa de precipitação menos intensa. Também se tem uma imagem com muitas células soltas, ou seja, a chuva não é contínua nesse caso, o que pode perturbar os métodos. A velocidade radial neste momento, Figura 31, indica que o vento está de oeste para leste.

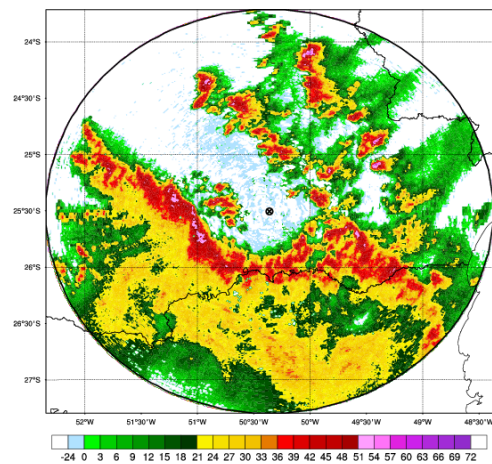
Figura 31: PPI da velocidade radial(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 8 de setembro de 2009 às 05 16 UTC.

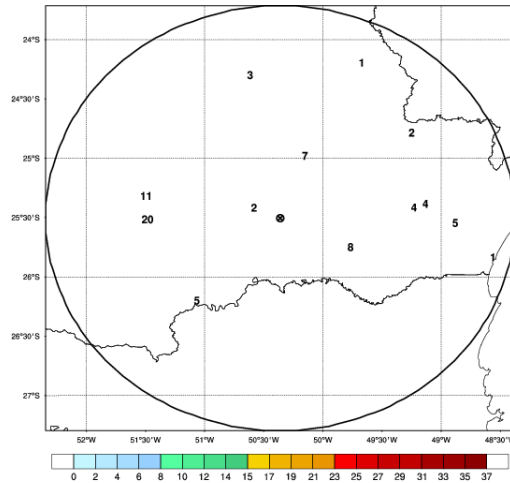
Figura 32: PPI da refletividade (Z)



Fonte: O autor

Nota: 8 de setembro de 2009 às 05 16 UTC.

Figura 33: Rede de anemômetros(m/s)



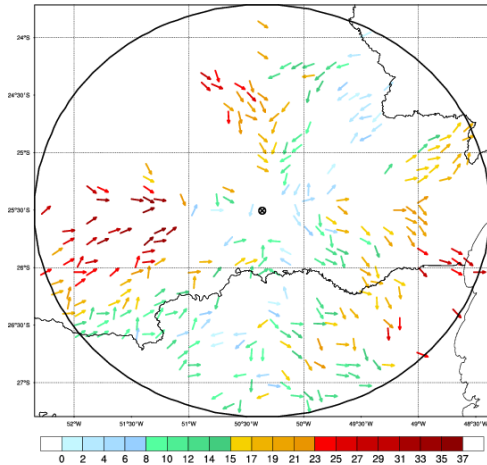
Fonte: O autor

Nota: 8 de setembro de 2009 às 05 15 UTC.

A rede de anemômetros, Figura 33, indica que a rajada do vento é baixa, já no leste aparecem valores altos como 11m/s e 20m/s . Essa parte com rajada de vento coincide com a parte do radar onde ocorreu maior precipitação.

Na Figura 34 o método conseguiu recuperar o vento adequadamente com rajadas na parte sudeste, entretanto nota-se que existem menos vetores do que deveriam ter - isto deve-se ao fato já comentado de que o VAP utiliza três feixes consecutivos. Nota-se que existem vetores "perdidos", ou seja, vetores que não acompanham o fluxo normal do vento. Isso ocorre porque a velocidade radial nessa imagem contém ruídos que interferem diretamente no VAP. O método conseguiu recuperar a intensidade do vento, pois na região leste aparecem vetores com velocidade alta e no oeste com intensidade menor, assim como ocorre com a rede de anemômetros na Figura 33.

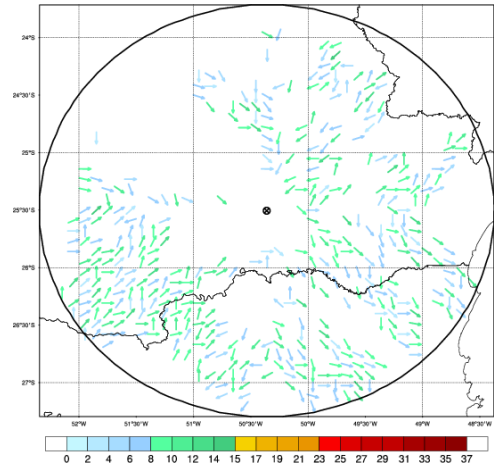
Figura 34: Resultado do VAP(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 8 de setembro de 2009 às 05 16 UTC.

Figura 35: Resultado do TREC(m/s)



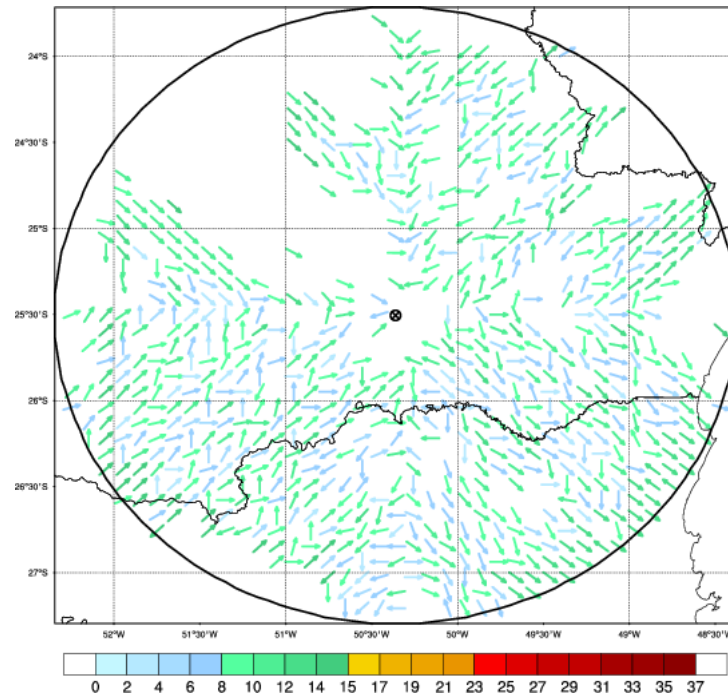
Fonte: O autor

Nota: 8 de setembro de 2009 às 05 16 UTC.

O campo retornado pelo método TREC, Figura 35 mostra o campo de vento se deslocando de leste para oeste e na região norte o campo segue para sul, o que pode ser verificado através da Figura 31. Novamente o TREC apresenta mais vetores na figura e é mais suave o deslocamento, no entanto os valores do vento ainda são menores do que os captados pelo radar, mas próximos dos valores dos anemômetros.

A Figura 36 representa o campo da nova metodologia. O campo assim como nos outros métodos desloca-se no sentido oeste-leste. A região ao norte do radar tem o sentido sul como preferência.

Figura 36: Resultado da nova metodologia(m/s)



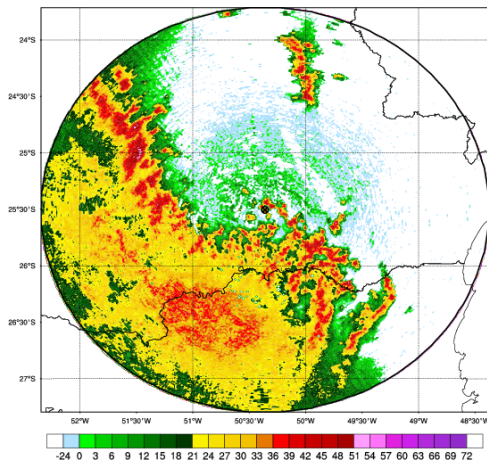
Fonte: O autor

Nota: 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.

4.7 Caso 3

Este evento apresenta 30 imagens de radar das 03 01 UTC até 06 37 UTC. O caso apresenta uma linha de precipitação intensa seguida de uma região de precipitação menos intensa. O sistema se desloca no sentido sudoeste para noroeste com uma pequena célula situada ao norte do radar. Este caso apresenta ainda uma grande quantidade de ecos de terreno no centro do radar. Outro ponto importante a se destacar é que a maioria dos dados da imagem concentra-se na borda do radar. Isso se destaca porque o campo de vento pode não ser recuperado de maneira satisfatória. A imagem do radar analisada nesse dia será a das 06 37 UTC.

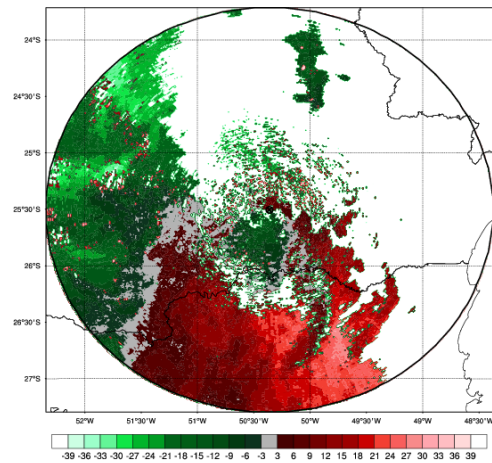
Figura 37: PPI da refletividade (Z)



Fonte: O autor

Nota: 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.

Figura 38: PPI da velocidade radial(m/s)



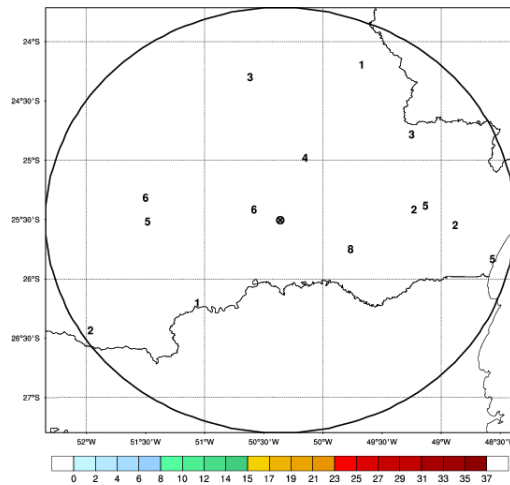
Fonte: O autor

Nota: 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.

A Figura 37 indica uma linha de alta refletividade com a célula precipitante ao norte. Na Figura 38 tem-se que o vento radial está se propagando no sentido noroeste para sudeste. A célula ao norte tem o vento se propagando no sentido do radar.

A rede de anemômetros, Figura 39, capta pequenas intensidade de rajada vento chegando a $8m/s$.

Figura 39: Rede de anemômetros(m/s)



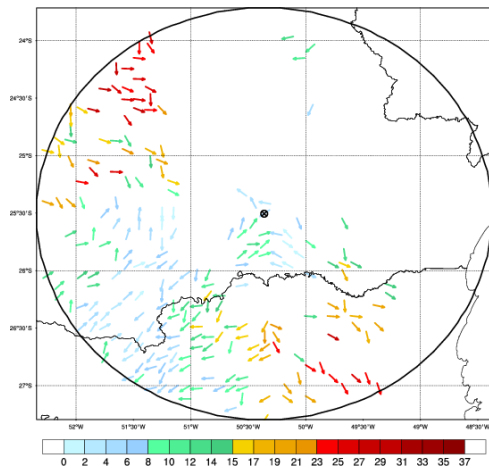
Fonte: O autor

Nota: 12 de outubro de 2009 às 06 45 UTC.

As Figuras 40 e 41 mostram os resultados dos métodos VAP e TREC, respectivamente. O método VAP obteve um resultado razoável. O fluxo do vento aponta realmente de noroeste para sudeste, mas na parte cinza da Figura 38 onde o vento deveria ser tangente ao radar, os vetores do VAP vem e vão de encontro ao radar. Na célula ao norte fica evidente que a falta de feixes prejudica o método VAP, os vetores apontam para leste e para sul.

O TREC preencheu mais os espaços e o fluxo do vento e fica mais evidente o fluxo do vento de noroeste para sudeste. Mas também ocorreu problema dos vetores tangentes ao radar. Um dos motivos é que a parte cinza, 38, se desloca de sudoeste para noroeste e esta parte se mantém quase inalterada devido ao fato do vento estar perpendicular ao radar: os vetores tendem a apontar em uma destas direções. Na célula ao norte aparecem mais vetores do que no VAP e estes apontam geralmente para sudoeste. O valor da intensidade do vento foi novamente mais parecido com os dados dos anemômetros do que com os dados de radar.

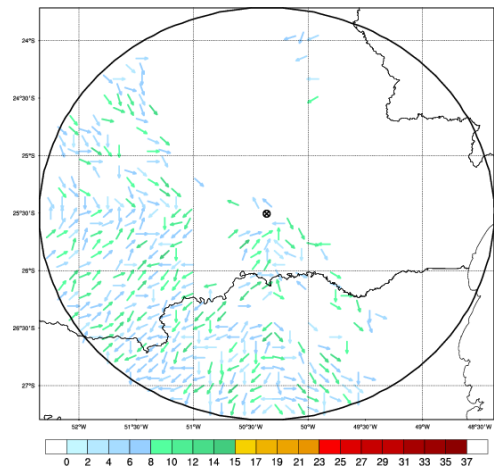
Figura 40: Resultado do VAP(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.

Figura 41: Resultado do TREC(m/s)

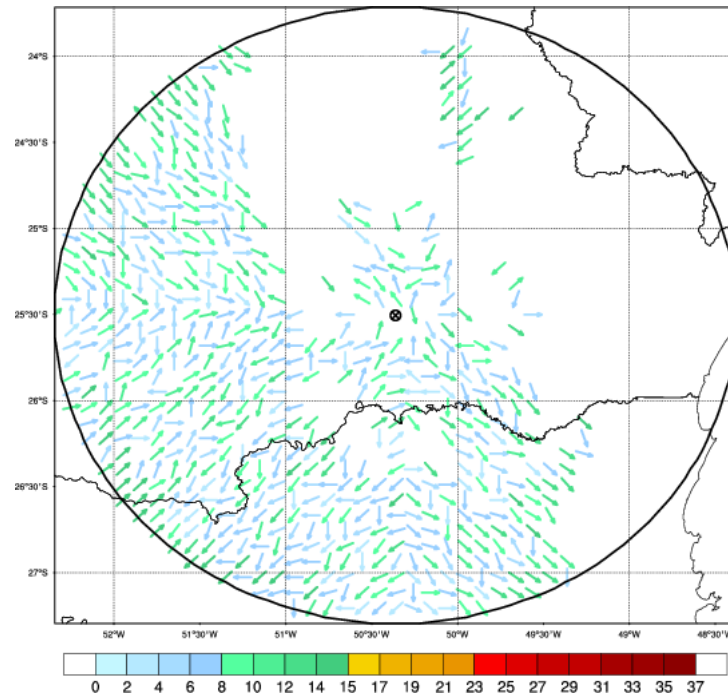


Fonte: O autor

Nota: 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.

Para este caso a nova metodologia, Figura 42, tem o campo de vetores de noroeste para sudeste. Assim como nos outros métodos, a parte correspondente a cinza da Figura 38 tem uma mudança abrupta de direção, o que ocorre pelo mesmo motivo do TREC. A célula ao norte do radar fica mais evidente do que nas outras técnicas e aponta para o sudoeste.

Figura 42: Resultado da nova metodologia(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.

4.8 Caso 4

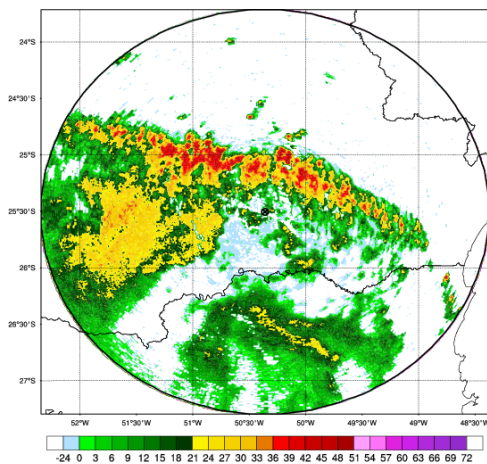
Este dia apresenta uma linha de grande convecção deslocando-se rapidamente de sudoeste para noroeste. Este caso contém 25 imagens de radar das 09 07 UTC até 12 07 UTC. Outro ponto interessante é que o sistema não apresentou uma precipitação contínua, ou seja, existiram "buracos" em que não houve precipitação.

Para este caso escolheu-se a imagem das 11 45 UTC. Como se pode ver na Figura 43 existiu uma intensa precipitação na linha logo ao norte do radar e ao leste uma área de precipitação menor. Também ocorreu ao sul do radar uma grande área com precipitação baixa. Nota-se que existiram várias partes no meio do sistema em que não houve pre-

cipitação.

Na Figura 44 tem-se o vento radial a leste apontando para o radar, isto é, para oeste. A região sul aponta para o centro do radar. Uma porção mais a oeste está se afastando do radar. Tudo isso indica que o vento está se deslocando do sudoeste sentido norte e depois indo para leste.

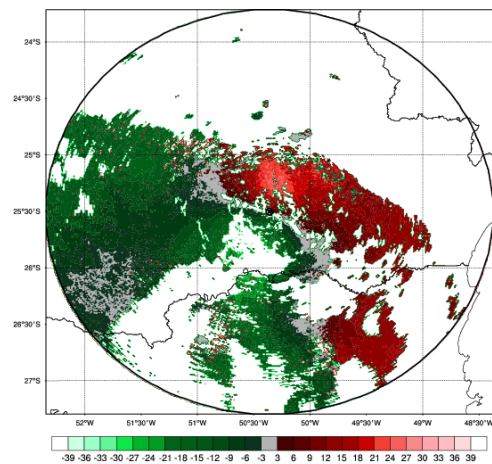
Figura 43: PPI da refletividade (Z)



Fonte: O autor

Nota: 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.

Figura 44: PPI da velocidade radial(m/s)

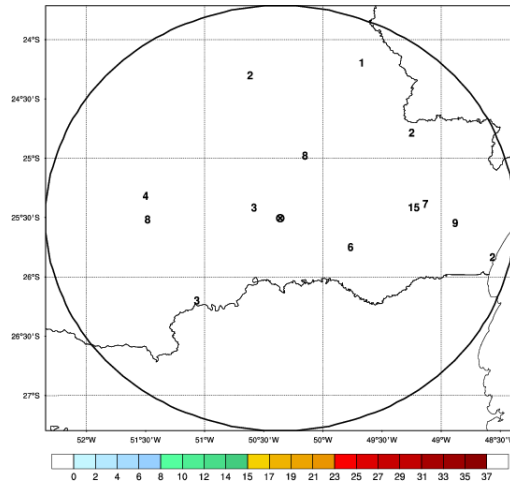


Fonte: O autor

Nota: 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.

A rede de anemômetros, Figura 45, tem uma grande variabilidade, apresentando valores pequenos a leste e maiores a oeste, com um valor máximo de 15m/s . Ao lado desse valor, outro anemômetro captou ventos de 7m/s , o que demonstra a variabilidade do vento.

Figura 45: Rede de anemômetros(m/s)



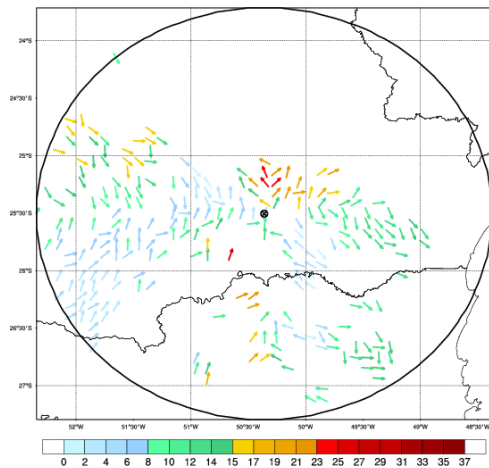
Fonte: O autor

Nota: 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.

O método VAP, ilustrado na Figura 46, conseguiu retornar o campo de vento com o deslocamento de leste à oeste. Inclusive percebe-se que o vento tem a rotação sul-norte-leste. Entretanto as pequenas células de vento presentes ao norte do radar não foram recuperadas e nas partes em que há lacunas na precipitação existem poucos vetores.

O TREC, Figura 47, apresentou o campo de vento de leste a oeste com um maior preenchimento de vetores. A rotação sul-norte-leste também foi caracterizada. Mas, assim como no VAP, não foi possível observar as células ao norte do radar.

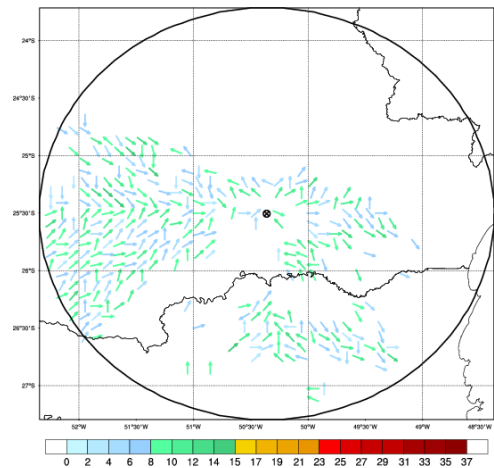
Figura 46: Resultado do VAP(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.

Figura 47: Resultado do TREC(m/s)

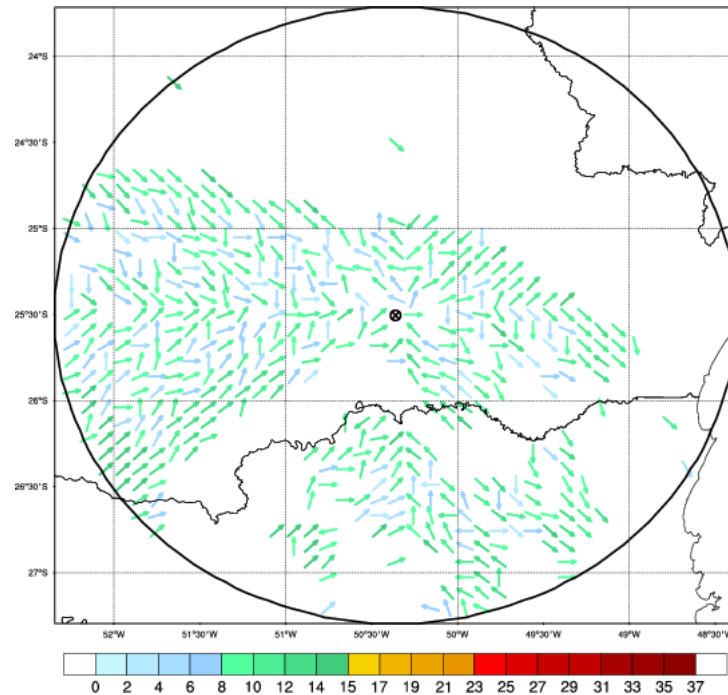


Fonte: O autor

Nota: 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.

Nesse caso vê-se que na Figura 48 o vento se desloca de leste para oeste e que na região ao sul do radar o vento segue para norte e depois para leste. Assim, o método recuperou o sentido geral do vento e ainda a rotação sul-norte-leste. O método obteve sucesso em determinar o sentido do vento de algumas das células contidas ao norte do radar.

Figura 48: Resultado da nova metodologia(m/s)



Fonte: O autor

Nota: 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.

4.9 Comparações

Nesta seção será feita comparações entre os métodos vistos no Capítulo 4 com base nos resultados presentes nas Seções 4.5, 4.6, 4.7, 4.8.

No que se refere à quantidade de vetores nas imagens, o método VAP foi o que apresentou a menor quantidade. Isto se deveu ao fato do método necessitar de três feixes de radar para realizar o cálculo. Isto se torna um empecilho quando a região de chuva não é contínua ou quando as células não são grandes o suficiente.

A nova metodologia foi a que apresentou mais vetores nas imagens. O método TREC foi satisfatório em quase todos os testes nesse sentido, entretanto quando as células

eram demasiadamente pequenas tornou-se difícil identificar para onde o box foi deslocado.

Todas as metodologias testadas conseguiram recuperar o campo de vento. O método VAP foi o mais sensível na direção do vento, porém foi o que mais se aproximou na intensidade do vento do dado do radar. Tanto o TREC quando a nova metodologia geraram campos de ventos mais suaves do que o VAP, a nova metodologia ainda mais que o TREC. No entanto nas duas metodologias a intensidade do vento retornado ficou abaixo do observado no radar, mas perto do que os dados de anemômetro indicaram.

Nas situações especiais em que ocorreram rotações, como no caso da Seção 4.5, ou com células pequenas, Seção 4.8, as metodologias tiveram algumas diferenças. No VAP a rotação foi percebida mais levemente, enquanto os outros métodos foram mais evidentes. As células menores foram menos detectadas com o VAP do que com o TREC, enquanto que a nova metodologia obteve mais sucesso nesse quesito.

O tempo de execução para calcular o campo de vento apresentou o VAP como o mais rápido. Isto se deve basicamente à simplicidade do método. Logo a seguir o método TREC, que foi mais lento, pois o cálculo das correlações dos boxes não é simples. Por último ficou a nova metodologia que, além de calcular as correlações, calcula o designamento ótimo dos boxes.

Datas	VAP	TREC	Nova
15/11/2009	0.16	0.39	7.2
08/09/2009	0.20	0.45	9
12/10/2009	0.21	0.45	8.6
22/03/2009	0.17	0.44	7.1

Tabela 1: Tabela dos tempos de execução dos métodos em minutos.

Outro meio de avaliar o campo de vento produzido pelas metodologias é através da raiz dos erros quadrados da diferença entre o mesmo pixel da velocidade radial pela velocidade do vento retornada pela metodologia. A Tabela 2 mostra os valores das três metodologias implementadas.

Datas	VAP	TREC	Nova
15/11/2009	3.58	9.49	7.56
08/09/2009	8.31	16.44	12.39
12/10/2009	7.90	13.59	10.20
22/03/2009	5.93	10.52	7.05

Tabela 2: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios

O método VAP apresentou o menor erro, seguido da nova metodologia, e o TREC foi o último. Um dos motivos do VAP apresentar o menor erro é que o método é diretamente derivado da velocidade radial. Outro fator é que o método calcula o vento pixel a pixel enquanto as outras metodologias necessitam de 16 pixels, boxes de 4 pixels de lado, para calcular o campo de vento.

Outra comparação pode ser feita entre os métodos, avaliando a diferenças entre as componentes u e v . Que podem ser vistas nas Tabelas 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10.

Métodos	VAP	TREC	Nova
VAP	X	13.16	12.80
TREC	13.16	X	4.66
Nova	12.80	4.66	X

Tabela 3: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente u do teste de 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.

Métodos	VAP	TREC	Nova
VAP	X	10.75	10.37
TREC	10.75	X	4.70
Nova	10.37	4.70	X

Tabela 4: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente v do teste de 15 de novembro de 2009 às 22 07 UTC.

Métodos	VAP	TREC	Nova
VAP	X	12.60	12.13
TREC	12.60	X	5.67
Nova	12.13	5.67	X

Tabela 5: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente u do teste de 8 de setembro de 2009 às 05 15 UTC.

Métodos	VAP	TREC	Nova
VAP	X	10.98	10.65
TREC	10.98	X	5.69
Nova	10.65	5.69	X

Tabela 6: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente v do teste de 8 de setembro de 2009 às 05 15 UTC.

Métodos	VAP	TREC	Nova
VAP	X	11.18	10.97
TREC	11.18	X	5.15
Nova	10.97	5.15	X

Tabela 7: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente u do teste de 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.

Métodos	VAP	TREC	Nova
VAP	X	11.25	11.00
TREC	11.25	X	5.29
Nova	11.00	5.29	X

Tabela 8: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente v do teste de 12 de outubro de 2009 às 06 37 UTC.

Métodos	VAP	TREC	Nova
VAP	X	10.02	9.68
TREC	10.02	X	5.58
Nova	9.68	5.58	X

Tabela 9: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente u do teste de 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.

Métodos	VAP	TREC	Nova
VAP	X	12.51	12.14
TREC	12.51	X	5.32
Nova	12.14	5.32	X

Tabela 10: Tabela das raízes dos erros quadráticos médios entre métodos para a componente v do teste de 22 de março de 2010 às 11 45 UTC.

Essas tabelas indicam que os campos de vento retornados pelos métodos são na verdade distintos uns dos outros. A maior semelhança ocorreu entre a nova metodologia e o TREC, basicamente porque uma é derivada da outra. As diferenças destas para o VAP devem-se ao fato de que as resoluções das imagens são diferentes, e que a nova metodologia e o TREC recuperam o campo médio e isto influencia as componentes u e v .

Apesar destas comparações entre as raízes dos erros quadrados médio serem comuns na literatura, elas podem ser enganosas. A nova metodologia e o método TREC tentam recuperar a velocidade do vento médio e isto é comparado com a velocidade radial do vento, o que não é a velocidade de fato do vento, como visto na Seção 1.5.1. Mesmo o método VAP tenta recuperar a velocidade real do vento quando ele está tangencial ao radar. Portanto nas áreas em que o vento está tangente ao radar, obviamente, a diferença será maior.

Outro fato a ser acrescentado é que a medição do radar varia de altura conforme a distância do centro do radar e por isso há uma grande dificuldade de comparação com os dados de superfície que sempre se mantém à 10m do nível do solo.

5 Conclusão

A recuperação do campo de vento tem importante papel na meteorologia. Ajuda os meteorologistas na hora de emitir alertas para diversos órgãos governamentais e empresas parceiras, como a COPEL, defesa civil, bombeiros, etc., que podem utilizar estes serviços para minimizar prejuízos causados pelos ventos. No entanto a recuperação do campo de vento é uma tarefa difícil porque o vento tem uma variabilidade espacial e temporal muito grande. Logo, instrumentos e métodos são de suma importância para a recuperação.

Neste caso o uso do radar meteorológico e dos métodos que utilizam as informações do radar é bastante útil. O radar meteorológico é um aparelho que pode prover dados da velocidade radial do vento com grande resolução espacial e temporal, mas são necessários outros métodos, utilizando o potencial do radar, para extrair ainda mais informações dos dados do radar, como o VAP e o TREC.

O método VAP é relativamente novo. Ele utiliza a geometria do radar e as informações de velocidade radial para retornar o campo de vento. Com a vantagem de ser um método rápido, o VAP perde, no entanto, por ser muito sensível aos dados de radar.

O método TREC é um pouco mais antigo que o VAP. Esse método utiliza duas imagens consecutivas do radar e, analisando os padrões existentes nas duas imagens, ele obtém o campo de vento. O TREC divide as imagens em boxes e os correlaciona, e onde ocorrer a maior correlação é dito que esse box se deslocou nessa direção, e portanto o vento se propagou naquela direção. Este método é um pouco mais caro computacionalmente do que o VAP, porém não é tão sensível às perturbações nos dados oriundos do radar.

Uma nova metodologia foi introduzida neste trabalho para a recuperação do campo de vento tendo como base o método TREC. Essa metodologia se diferencia do TREC porque busca a designação ótima dos boxes. Isto é feito modelando o problema dos boxes em um Problema de Programação Linear Inteira. Este tipo de problema pode ser resolvido através do algoritmo Branch-and-Bound para se obter respostas inteiras. Esta

designação ótima retorna, também, um campo de vento factível assim como os métodos anteriores, porém com um custo computacional maior.

Para a implementação dos métodos fez-se uso da linguagem de programação *Python*. Os métodos VAP e TREC foram inteiramente implementados nessa linguagem, rodando em tempo real numa página interna do SIMEPAR. Foi possível a execução destes métodos em tempo real graças ao processamento paralelo feito pelos pacotes do *Python*, que contribuíram com uma redução no tempo de execução em torno de 1/3.

O método com menor custo computacional foi o VAP, seguido do TREC e da nova metodologia. Porém o VAP é consideravelmente mais sensível do que os outros, tendo um campo de vento mais perturbado. O campo de vento retornado pelo TREC foi menos perturbado do que o VAP. O campo de vento da nova metodologia pode ser considerado o menos perturbado e mais homogêneo, o que indica ter a maior semelhança com o vento real. A nova metodologia proposta neste trabalho foi implementada com sucesso e alcançou resultados satisfatórios.

Apesar de visualmente os métodos serem semelhantes, quando comparados em valores eles se tornam diferentes. Assim, apesar de um custo computacional maior, a nova metodologia consegue retornar um campo de vento tão bom quanto, ou melhor, do que os métodos existentes.

5.1 Sugestão de trabalhos futuros

Um ponto importante para trabalhos futuros seria a implementação dos métodos adjuntos e a sua comparação com os implementados neste trabalho.

Outra sugestão é utilizar as informações do vento para determinar para onde o sistema está se deslocando, e com isso efetuar uma previsão de curtíssimo prazo.

Também podem ser aplicados métodos semelhantes usando dados provenientes de satélites.

Outra sugestão para trabalho futuro é de comparar dados com radares que cubram a mesma área, quando estes forem instalados e até utilizar métodos por triangulação.

Referências

- BEAZLEY, D. M. *Python Essential Reference*. 4th. ed. [S.l.]: Addison-Wesley Professional, 2009.
- BENETI, C. A. A.; NOZU, I.; SARAIVA, E. A. Monitoramento da precipitação e de eventos de tempo severo com radar meteorológico no estado do paraná. Congresso Brasileiro de Meteorologia. 1998.
- BUDERI, R. *The Invention That Changed the World*. New York: Simon e Shuster, 1996.
- CHUMCHEAN, S.; SEED, A. S. A. An integrate approach to error correction for real-time radar-rainfall estimation. *American Meteorological Society*, v. 23, p. 67–79, January 2006.
- CONFERENCE, H. of P. L.; WEXELBLAT, R. L. *History of programming languages / edited by Richard L. Wexelblat*. [S.l.]: Academic Press, New York :, 1981.
- DANTZIG, G. *Linear programming and extensions*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press, 1963.
- FOUNDATION, P. S. *Python Programming Language - Official Website*. Agosto 2010. <http://wiki.python.org/moin/OrganizationsUsingPython>.
- FOUNDATION, P. S. *Python Programming Language Official Website*. Agosto 2010. <http://www.python.org/>.
- GAREY, M. R.; JOHNSON, D. S. *Computers and Intractability: A Guide to the Theory of NP-Completeness*. [S.l.]: W.H. Freeman, 1979.
- GHOSH, G. H. K. K.; CHEN, L. C. An interactive system for compositing digital radar and satellite data. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, v. 22, n. 5, p. 705–713, May 1983.
- GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. *Otimização Combinatória e Programação Linear: Modelos e Algoritmos*. Rio de Janeiro: Editora Campus.
- JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. *Applied Multivariate Statistical analysis*. 2nd. ed. New Jersey: Prentice Hall, Inc., 1998.
- KACHIGAN, S. K. *Statistical Analysis An Interdisciplinary Introduction to Univariate and Multivariate Methods*. New York, NY: Radius Press, 1986.
- LAND, A. H.; DOIG, A. G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrica*, v. 28, p. 497–520, 1960.
- LIANG, X. An integrating velocity-azimuth process single-doppler radar wind restriveal method. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 24, p. 658–665, 2007.

- LUTZ, M. *Learning Python*. 4th. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, 2009.
- MARSHALL, J. S.; PALMER, W. M. The distribution of raindrops with size. *Journal of Meteorology*, v. 5, p. 165–166, 1948.
- MARTELLI, A.; RAVENSCROFT, A.; ASCHER, D. *Python Cookbook*. 2nd. ed. [S.l.]: O'Reilly Media, 2005.
- MIDDLETON, W. E. K. *Invention of the meteorological instruments*. Baltimore: Johns Hopkins Press, 1969.
- MURTY, K. G. *Linear and Combinatorial Programming*. Malabar, Florida: Robert E. Krieger Publishing Company, 1985.
- NICHETTI, D. V. *Otimização na programação de horários de trabalho aplicado ao setor de agendamento de consultas em hospitais*. Curitiba, Brazil: [s.n.], 2009. Trabalho de Conclusão de Curso, Matemática Industrial.
- PUCCINI, A. L.; PIZZOLATO, N. D. *Programação Linear*. 2th. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos (LTC), 1990. (Série Aplicações de Computadores).
- RINEHART, R. E. Internal storm motions from a single non-doppler weather radar. NCAR/TN-146+STR. 1979.
- RINEHART, R. E. *Radar For Meteorologists*. 4th. ed. [S.l.]: Rinehart Publishing, 2004.
- SCHRAGE, L. *Optimization Modeling with Lingo*. 5th. ed. Chicago, IL: [s.n.], 2002.
- SILVA, T. C. L. . *O Problema de Programação de Horários de Trabalho Considerando Preferências e Hierarquia: Aplicação a uma Escala de Plantão de Militares*. Curitiba, Brazil: [s.n.], 2002. Dissertação de mestrado, Programa de Métodos Numéricos em Engenharia.
- SIMEPAR, I. T. *SIMEPAR*. Maio 2011. <http://www.simepar.br/>.
- SMYTHE, G. R.; ZRNIC', D. S. Correlation analysis of doppler radar data and retrieval of horizontal wind. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, v. 22, p. 297–311, 1983.
- SUN, J. Fitting a cartesian prediction model to radial velocity data from a single-doppler radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 11, p. 200–204, 1994.
- SUN, J.; FLICKER, D. W.; LILLY, D. K. Recover of three-dimensional wind and temperature fields from simulated single-doppler radar data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 48, p. 876–890, 1991.
- SYSTEMS, L. *LINDO Systems - Optimization Software: Integer Programming, Linear Programming, Nonlinear Programming, Global Optimization*. Agosto 2010. <http://www.lindo.com/>.
- TABARY, P.; SCIALOM, G. Real-time retrieval of the wind from aliased velocities measured by doppler radars. *American Meteorological Society*, v. 18, p. 875–882, 2001.
- TRIOLA, M. F. *Introdução à Estatística*. 7th. ed. Rio de Janeiro: [s.n.], 1999.

TUTTLE, J. D.; FOOTE, G. B. Determination of the boundary layer airflow from a single doppler radar. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, April 1990.

XU, Q.; QUI, C.-J. Simple adjoint methods for single-doppler wind analysis with a strong constraint of mass conservation. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, v. 11, p. 289–298, 1994.

XU, Q.; QUI, C.-J.; YU, J.-X. Adjoint-method retrievals of low-altitude wind fields from single-doppler wind data. *American Meteorological Society*, v. 11, p. 579–585, 1994.

ZHENG, Y.; S.LIU; BAI, Z. J. Verification of wind field retrieval of doppler radar velocity-azimuth processing method. Thirtieth-first Conference on Radar Meteorology. 2003.

ZHOU, Y.; STULL, R. Single-doppler radar wind-field retrieval experiment on a qualifield velocity-azimuth processing technique. Ninth Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans, and Land Surface (IOAS-AOLS). 2005.

ANEXO A – Algoritmo do Lingo

Neste anexo é apresentado o algoritmo que é executado pelo Lingo.

Algoritmo A.1

model:

!Definindo as variáveis do modelo sets:

ORIGEM / 1.. 10001 /;

DESTINO / 1.. 10001 /;

OR_DEST (ORIGEM,DESTINO) /

!Arquivo de entrada das variáveis que se relacionam

@file('D:\André\mestrado\img_relacao.txt')/:X,COR;

endsets

!Definindo a função objetivo

*Max = @SUM(or_dest: X*cor);*

!Arquivos com as restrições de destino e origem respectivamente

@file('D:\André\mestrado\img\rest_de.txt')

@file('D:\André\mestrado\img\rest_or.txt')

!Definindo variáveis binárias

@for(or_dest:@bin(x));

!Arquivo com os dados das correlações

data:

cor=@file('D:\André\mestrado\img_correlacao.txt');

enddata

end

terseo

!Definindo arquivo de saída

divert D:\André\mestrado\img\saida_1.txt

go

nonz x

rurt

quit