

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA**

FELIPE ARRUDA MOURA

**ANÁLISE QUANTITATIVA DA
DISTRIBUIÇÃO DE JOGADORES DE
FUTEBOL EM CAMPO DURANTE
JOGOS OFICIAIS**

Campinas
2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA**

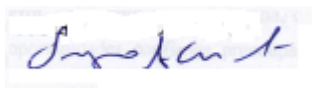
FELIPE ARRUDA MOURA

**ANÁLISE QUANTITATIVA DA
DISTRIBUIÇÃO DE JOGADORES DE
FUTEBOL EM CAMPO DURANTE
JOGOS OFICIAIS**

Tese de Doutorado apresentada à Pós-Graduação da Faculdade de Educação Física da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Educação Física na Área de Concentração de Ciências do Desporto.

Orientador: Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL
DA TESE DE DOUTORADO DEFENDIDA PELO ALUNO
FELIPE ARRUDA MOURA E ORIENTADA PELO PROF.
DR. SERGIO AUGUSTO CUNHA



Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha

Campinas
2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA POR
ANDRÉIA DA SILVA MANZATO – CRB8/7292
BIBLIOTECA DA FACULDADE DE EDUCAÇÃO FÍSICA UNICAMP

M865a Moura, Felipe Arruda, 1982-
Análise quantitativa da distribuição de jogadores de futebol em campo durante jogos oficiais / Felipe Arruda Moura. - Campinas, SP: [s.n.], 2011.

Orientador: Sergio Augusto Cunha
Tese (doutorado) – Faculdade de Educação Física, Universidade Estadual de Campinas.

1. Futebol. 2. Tática. 3. Área de ocupação. 4. Espalhamento. 5. Séries temporais. I. Cunha, Sergio Augusto. II. Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Educação Física. III. Título.

Informações para a Biblioteca Digital:

Título em inglês: Quantitative analysis of soccer players' distribution on the pitch during official matches.

Palavras-chaves em inglês:

Soccer

Tactics

Coverage área

Spred

Time series

Área de Concentração: Ciências do Desporto

Titulação: Doutorado em Educação Física.

Banca Examinadora:

Sergio Augusto Cunha [orientador]

Ricardo Machado Leite de Barros

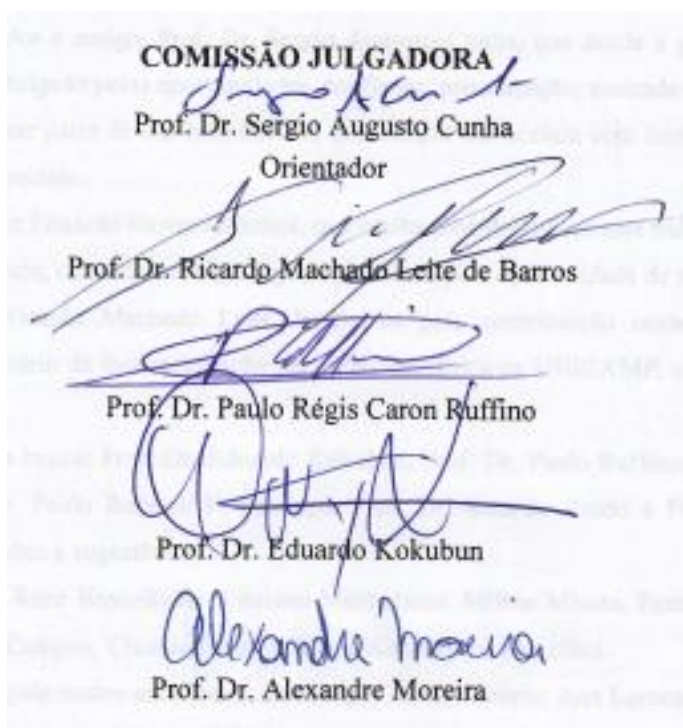
Paulo Régis Caron Ruffino

Alexandre Moreira

Eduardo Kokubun

Data da defesa: 04-11-2011

Programa de Pós-Graduação: Educação Física



Dedicatória

Ao longo de toda a caminhada, passei por muitas cidades. De São Paulo para Rio Claro, São Carlos, Ourinhos e Campinas. Não importava para quão longe eu ia, sempre tive o privilégio de ter pais presentes e que me deram toda a estrutura para que nada atrapalhasse minha luta para me tornar um professor. Mas tudo isso, na medida do possível, todo pai e mãe busca fazer pelos seus filhos. Há algo a mais que sinto vir dos meus pais que palavras não conseguem explicar. É esse algo a mais que faz com que meus pais sejam especiais.

Por alguns anos desta caminhada, tive que viajar de uma cidade a outra, para trabalhar e estudar. Nesse período, passava algumas noites no ônibus. Ao chegar às rodoviárias, ainda meio sonolento, a primeira imagem que vinha em minha cabeça era a dos meus pais. Eles me pediam para ligar quando chegasse, não importando a hora. O telefone não chegava a tocar duas vezes e logo eu ouvia a voz da minha querida mãe, aliviada em saber que eu havia chegado são e salvo. Nestes instantes eu percebia que não somente eu não tinha dormido direito.

Meus queridos pais também não. Diante desse sentimento, mesmo cansado e muitas vezes desanimado, eu estofava o peito, levantava a cabeça e assim me sentia muito mais forte para alcançar meu objetivo final.

Pelas noites mal dormidas, pelas orações, pelas preocupações, pela atenção e por todo amor que sinto vir de meu pai Maurício e de minha mãe Vera, dedico este trabalho a eles.

O dia que eu estiver com saudades de meus pais, vou me agarrar a esta tese. Eles estão presentes em cada letra aqui escrita.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais Vera e Mauricio, minha irmã Adriana e minha querida Totinha. Todo o suporte de vocês foi essencial para que eu conseguisse atingir meus objetivos. Com vocês ao meu lado, sempre me sentirei forte para buscar novos horizontes. Qualquer palavra aqui escrita não tem o poder de descrever o amor, as preocupações e orações que sinto vir de vocês.

À minha querida Juliana pelo companheirismo, carinho, amizade e incentivo. Tenho a sorte de ter você ao meu lado neste momento. Saiba que sua presença no dia a dia é uma benção para mim.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha, que desde a graduação contribui para minha formação. Obrigado pelas oportunidades, confiança, preocupação, amizade durante todos esses anos e por me deixar fazer parte de sua bela família, que sempre me recebeu com imenso carinho. Vocês serão sempre pessoas especiais.

Ao Prof. Dr. Luiz Eduardo Barreto Martins, que muito contribuiu com este trabalho e por ser para mim um exemplo de pessoa, cientista e amigo. Agradeço a Deus pela oportunidade de ter te conhecido.

Ao Prof. Dr. Ricardo Machado Leite de Barros pela contribuição neste trabalho e pelos ensinamentos no Laboratório de Instrumentação para Biomecânica da UNICAMP, onde este estudo foi realizado.

Aos membros da banca: Prof. Dr. Eduardo Kokubun, Prof. Dr. Paulo Ruffino, Prof. Dr. Antonio Carlos Gomes, Prof. Dr. Paulo Roberto P. Santiago, Prof. Dr. Ricardo Anido e Prof. Dr. Alexandre Moreira, pelas contribuições e sugestões.

Aos Professores René Brenzikofer, Luciano Mercadante, Milton Misuta, Pascual Figueroa, João Frederico Meyer, Mário Campos, Claudio Gobato pelos ensinamentos e auxílios.

Pela amizade e ajuda nestes anos todos, aos amigos de laboratório: Ana Lorena, Fernando, Jerusa, Aline, Karine, Márcio, Fernanda, Juliana Paris, Juliana Landolfi, Ana Carolina, Ana Francisca, Amanda, Juliana Carmona, Rafael, Angélica.

Aos funcionários da Faculdade de Educação Física da UNICAMP.

Aos meus alunos.

À minha família.

A Deus, por me abençoar com a vida, com inspirações e com a família maravilhosa que tenho.

MOURA, Felipe Arruda. **ANÁLISE QUANTITATIVA DA DISTRIBUIÇÃO DE JOGADORES DE FUTEBOL EM CAMPO DURANTE JOGOS OFICIAIS**. 2011. 83f. Tese (Doutorado em Educação Física)-Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

RESUMO

O objetivo deste estudo consistiu em realizar uma análise quantitativa da distribuição de jogadores de futebol em campo durante jogos oficiais. Foram obtidas as trajetórias de 277 jogadores de futebol em dez jogos, através de um sistema de rastreamento automático. A distribuição dos jogadores foi analisada de duas formas: através da área de ocupação da equipe e do espalhamento dos jogadores em campo. A área de ocupação foi definida como a área do envoltório convexo formado a partir da posição dos jogadores. O espalhamento da equipe foi medido como a norma de Frobenius da matriz de distâncias entre os jogadores. Em um primeiro estudo, foram analisadas a área de ocupação e o espalhamento ao longo do tempo e em situações de finalizações ($n=233$) e desarmes ($n=1897$). Com posse de bola, o espalhamento e a área de ocupação das equipes (mediana \pm intervalo de confiança) variou de $171,1 \pm 0,4$ a $214,6 \pm 0,4$ m e de $905,4 \pm 4,4$ a $1407,6 \pm 5,5$ m², respectivamente. Sem posse de bola, os valores foram menores ($p<0.05$) e variaram de $159,6 \pm 0,4$ a $197,3 \pm 0,5$ m e de $773,8 \pm 4,6$ a $1158,4 \pm 5,5$ m² para o espalhamento e área, respectivamente. Em situações de defesa, as equipes apresentaram maiores áreas de ocupação e espalhamento quando sofreram finalizações, comparadas às situações em que as mesmas realizaram desarmes. Já nas situações de ataque, as equipes apresentaram maiores valores de área e espalhamento quando sofreram desarmes, comparadas às situações em que as mesmas realizaram finalizações a gol. No segundo estudo, foram realizadas análises das séries temporais de área de ocupação e espalhamento das equipes para uma descrição da forma como os jogadores se organizam em campo em função do tempo de jogo. Com os dados no domínio do tempo, calculou-se o RMS (*root mean square*) de cada janela de tempo em que a equipe se encontrava com e sem posse de bola, separadamente. Ao fim deste processo, pontos discretos eram obtidos, relativos ao RMS de cada condição, para cada variável. Para analisar se a equipe alterava seus valores de área de ocupação e espalhamento ao longo da partida, realizou-se uma regressão linear para os valores de RMS. Correlação cruzadas também foram calculadas para análise de similaridade entre as séries temporais de equipes adversárias. Para análise dos dados no domínio da frequência, realizou-se a transformada rápida de *Fourier* (FFT) e em seguida foram calculadas as frequências predominantes e medianas de cada variável. Os resultados mostraram que as equipes estudadas diminuem as frequências medianas das variáveis do 1º para o 2º tempo, podendo refletir uma mudança de comportamento ou uma possível redução de desempenho físico dos atletas. Com as análises de RMS verificou-se que, constantemente, as equipes alteram de forma significativa sua organização em campo ao longo da partida. Além disso, as séries temporais entre equipes adversárias apresentaram uma relação de similaridade em fase. As ferramentas e dados analisados no presente estudo permitiram melhor compreender a forma como equipes brasileiras de futebol se organizam em campo e fornecem maiores subsídios para que técnicos consigam analisar taticamente suas equipes durante jogos e sessões de treinamento.

Palavras-Chaves: futebol; tática; área de ocupação; espalhamento; séries temporais.

MOURA, Felipe Arruda. **QUANTITATIVE ANALYSIS OF SOCCER PLAYERS' DISTRIBUTION ON THE FIELD DURING OFFICIAL MATCHES**. 2011. 83f. Tese (Doutorado em Educação Física) - Faculdade de Educação Física. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2007.

ABSTRACT

The purpose of this study was to analyze quantitatively the organization of soccer players on the pitch, during official matches. We obtained the trajectories of 277 football players in ten games with a tracking method. The soccer players' organization was analyzed using two variables: team coverage area and spread. Team coverage area was defined as the area of the convex hull formed by players' positions. Team spread was defined as the Frobenius norm of the distance-between-player matrix. In the first study, we calculated teams' coverage area and spread over time and in situations of shots on goal ($n=233$) and tackles ($n=1897$). While the players attacked, spread and area (median \pm confidence interval) ranged from $171,1\pm 0,4$ to $214,6\pm 0,4$ m m and from $905,4\pm 4,4$ to $1407,6\pm 5,5$ m², respectively. On defence, the values were smaller ($p<0.05$) and ranged from $159,6\pm 0,4$ a $197,3\pm 0,5$ m and from $773,8\pm 4,6$ to $1158,4\pm 5,5$ m² for the spread and the area. In defending circumstances, the teams presented a greater area and spread when they suffered shots on goal than when the teams performed tackles. In attacking situations, the teams presented a greater area and spread when they suffered tackles than when they performed shots on goal. In the second study, time-series analysis of teams' coverage area and spread were performed in order to describe how players organize themselves on the field as function of the match time. In the time domain, RMS (root mean square) was calculated for each window that team was with and without ball possession, separately. Then, discrete points were obtained, related to the RMS of each window, for each variable (area and spread). With the purpose of to analyze if team changed its coverage area and spread throughout the match, a linear regress of RMS values was determined. Cross-correlations were applied for the time series similarity analysis between opponent teams. For the frequency domain analysis, the fast Fourier transform (FFT) was performed and then predominant and median frequencies were calculated, for the first and second halves. Results showed that the majority teams presented a tendency of decreasing the median frequency from de first to the second half. This result may indicate a team behavior change or a possible decrease in players' physical performance. The RMS analyses verified that teams frequently change their organization on the pitch throughout the match. Furthermore, time-series between opponent teams presented an in-phase similarity relationship. The methods and data analyzed in the present study allowed us to better understand the Brazilian soccer teams' organization and provide greater subsidies for coaches in the tactical analysis of their teams during the match and during training sessions.

Keywords: soccer; tactics; coverage area; spread; time series

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação de ações táticas do futebol (Cunha et al., 2011).....	15
Figura 2. Representação da área de ocupação da equipe, conforme o método proposto por Okihara et al. (2004).....	17
Figura 1.1. Sistema de coordenadas do campo (X,Y) e configuração da posição das câmeras de vídeo.	21
Figura 1.2. Enquadramento adotado pelas câmeras durante a coleta de dados do <i>jogo1</i>	21
Figura 1.3. Interface do software DVideo que permite que algoritmos do processo de segmentação sejam editados e assim criados os <i>blobs</i>	23
Figura 1.4. Identificação da posição de cada jogador em campo ao longo de uma sequência de imagens.	24
Figura 1.5. Pontos medidos no campo, utilizados para a calibração das câmeras.	24
Figura 1.6. Interface do <i>software</i> DVideo utilizada para a identificação das ações técnicas realizadas pelos jogadores e outros eventos que ocorriam durante a partida.	26
Figura 1.7. Representação da sequência de etapas para identificação dos vértices do envoltório convexo, através da técnica Quickhull.	28
Figura 1.8. Representação do envoltório convexo de cada equipe (A), da triangulação de suas áreas (B) e da área de ocupação das equipes (C).....	28
Figura 1.9. Representação das distâncias euclidianas entre cada jogador e todos os seus companheiros de equipe, em um determinado instante de tempo.	29
Figura 1.10. Representação da área de ocupação de uma equipe em um determinado instante de tempo t e as áreas de ocupação da mesma equipe após três simulações de alterações nas coordenadas x e y dos atletas.	33
Figura 2.1. Área de ocupação e espalhamento das equipes $tm1$ e $tm2$ durante 10 minutos de jogo.....	41
Figura 2.2. Área de ocupação (A) e espalhamento (B) das equipes durante uma troca de posse de bola.....	41
Figura 3.1. Procedimento usado no cálculo de RMS de cada janela da série temporal, nas condições em que a equipe se encontrava com e sem posse de bola.....	56
Figura 3.2. Representação da frequência predominante e frequência mediana do espectro de potência de uma série temporal. A frequência mediana divide a integral do espectro de potência em duas partes iguais.	57
Figura 3.3. Séries temporais de área de ocupação e espalhamento entre diferentes equipes analisadas.	59
Figura 3.4. Análise da similaridade entre as séries temporais de equipes adversárias, para as variáveis estudadas, realizada por correlação cruzada.....	59
Figura 3.5. Exemplificação da análise de tendência de alteração dos valores de magnitude da área de ocupação em função do tempo de jogo, para $tm8$ e $tm9$ nas condições em que a	

equipe se encontrou sem e com posse de bola, respectivamente, durante o 1º tempo de jogo. 63

Figura 3.6 Exemplificação da análise de tendência de alteração dos valores de magnitude do Espalhamento em função do tempo de jogo, para *tm5* e *tm10* nas condições em que a equipe se encontrou sem e com posse de bola, respectivamente, durante o 2º tempo de jogo. 63

Figura 3.7. Espectro de potência da área de ocupação de *tm3* e *tm4* em função da frequência durante os períodos de jogo (1º e 2º tempo). 64

Figura 3.8. Espectro de potência do espalhamento de *tm3* e *tm4* em função da frequência durante os períodos de jogo (1º e 2º tempo). 64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Descrição do número de jogadores rastreados, incluindo titulares e reservas, e o ano de ocorrência de cada jogo.	22
Tabela 1.2. Descrição das dimensões de cada campo e os valores máximos possíveis para as variáveis de espalhamento e área de ocupação.	31
Tabela 2.1. Área de ocupação (m^2) e espalhamento (m) de todas as equipes analisadas, nas condições em que as mesmas se encontravam com e sem posse de bola.	42
Tabela 2.2. Coeficientes de correlação (ρ) entre a área de ocupação e espalhamento de cada equipe.	43
Tabela 2.3. Tabela de contingência para o número de <i>frames</i> em que cada equipe apresentou maiores valores de área de ocupação que seu adversário, quando se encontrava com e sem posse de bola.	43
Tabela 2.4. Tabela de contingência para o número de <i>frames</i> em que cada equipe apresentou maiores valores de espalhamento que seu adversário, quando se encontrava com e sem posse de bola.	44
Tabela 2.5. Área de ocupação e espalhamento (mediana \pm intervalo de confiança) em situações de desarmes (n=1897) e finalizações (n=233), nas condições em que as equipes defendiam.	45
Tabela 2.6. Área de ocupação e espalhamento (mediana \pm intervalo de confiança) em situações de desarmes (n=1897) e finalizações (n=233), nas condições em que as equipes atacavam.	45
Tabela 3.1. Resultados da análise de correlação cruzada entre as séries temporais de equipes adversárias.	60
Tabela 3.2. Resultados da magnitude da área de ocupação e sua tendência de alteração em função do tempo de jogo, estratificados pelas condições em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola.	61
Tabela 3.3. Resultados da magnitude do espalhamento e sua tendência de alteração em função do tempo de jogo, estratificados pelas condições em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola.	62
Tabela 3.4. Resultados das análises espectrais realizadas nas séries temporais de área de ocupação de todas as equipes, durante o primeiro e segundo tempo de jogo.	65
Tabela 3.5. Resultados das análises espectrais realizadas nas séries temporais de espalhamento de todas as equipes, durante o primeiro e segundo tempo de jogo.	66
Tabela 3.6. Resultados das análises espectrais realizadas nas séries temporais de posse de bola, para todos os jogos, durante o primeiro e segundo tempo de jogo.	67

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	5
RESUMO	6
ABSTRACT	7
1 Introdução	13
Capítulo 1 - Descrição de materiais e métodos, definição e descrição das variáveis de área de ocupação e espalhamento de jogadores em campo.....	20
1.1 - Coleta de dados	20
1.2 - Participantes e método de rastreamento automático	21
1.3 - Identificação e registro das ações técnicas.....	25
1.4 - Descrição das variáveis analisadas: área de ocupação da equipe.....	26
1.5 - Descrição das variáveis analisadas: espalhamento da equipe	29
1.6 - Valores máximos de área de ocupação e espalhamento.....	30
1.7 - Simulações de mudanças nas posições dos jogadores e suas influências nas variáveis analisadas.....	31
Capítulo 2: Análise quantitativa da distribuição de jogadores de futebol brasileiro em campo.....	35
2.1 - Introdução	35
2.2 - Métodos.....	37
2.3 - Resultados	40
2.4 - Discussão.....	45
2.5 - Conclusões	48
Capítulo 3: Análise das séries temporais da área de ocupação e do espalhamento de jogadores de futebol em campo.	50
3.1 - Introdução	50
3.2- Métodos.....	52
3.3 - Resultados	58
3.4 - Discussão.....	67
3.5 - Conclusões	73

4 Conclusões	74
5 Referências	77
Apêndices.....	81
Anexo I.....	83
Anexo II	85

1 Introdução

O futebol é o esporte mais popular do mundo, com 208 Federações registradas na FIFA (*Fédération Internationale de Football Association*), órgão máximo que rege o esporte, e praticado por homens e mulheres, adultos e crianças com diferentes níveis de experiência. Assim como em outros esportes, a utilização da ciência contribui para o aumento do desempenho de seus praticantes, nestes diferentes níveis (Reilly, 1996; Stolen et al., 2005).

Nos anos mais recentes, houve uma marcante expansão das ciências dos esportes, sendo a mesma reconhecida tanto academicamente quanto uma área válida de prática profissional. Uma nova maturidade se tornou aparente à medida que as ciências dos esportes foram cada vez mais aplicadas para resolver problemas particulares a cada esporte. Uma dessas aplicações específicas ocorreu com o futebol (Reilly, 1996). Dessa forma, há uma constante busca por ferramentas capazes de identificar, compreender e analisar o desempenho de atletas e equipes durante jogos e competições, com o propósito de aumentar a possibilidade de sucesso na referida modalidade esportiva, independente do nível de prática, habilidade ou experiência.

Para uma análise quantitativa do desempenho de atletas durante situações de competição e treinamento, uma série de ferramentas manuais e computacionais tem sido desenvolvida ao longo dos anos (Hughes e Franks, 1997). Os primeiros estudos que buscaram analisar os deslocamentos de jogadores em campo utilizavam uma metodologia que consistia em, inicialmente, quantificar o comprimento da passada de atletas de futebol em diferentes velocidades. Em seguida, os pesquisadores filmavam todos os movimentos do atleta durante o jogo e, com as imagens, faziam uma estimativa de quantos passos o jogador realizava em cada velocidade. Apesar dos erros inerentes a esse tipo de coleta de dados, os autores disponibilizaram na época os registros de distâncias percorridas de jogadores de futebol profissional durante toda uma partida (Reilly e Thomas, 1976; Withers et al., 1982).

A partir deste estudo, diversas metodologias foram desenvolvidas com o principal objetivo de identificar a posição do jogador em campo em função do tempo. Determinada sua posição permitiu, *a priori*, a quantificação de variáveis físicas do desempenho dos atletas, como distâncias percorridas e velocidades, com um maior controle. Assim, surgiram

metodologias com a utilização de potenciômetros acoplados a câmeras de vídeo (Ohashi et al., 1988; Ohashi et al., 2002), de GPS – Sistema de posicionamento global (Hennig e Sterzing, 1999) e até mesmo sensores acoplados aos atletas (LPM[®]: www.inmotio.eu), para que suas posições ao longo do tempo fossem registradas. No entanto, estes possuem alguns fatores limitantes. O método baseado em potenciômetros permite somente o registro de um jogador para cada par de câmeras, processo que dificulta a obtenção de todos os jogadores em campo. Já o uso de GPS e sensores não é permitido em jogos oficiais, de acordo com as regras da FIFA.

Deste modo, metodologias baseadas em videogrametria passaram a ser desenvolvidas (Intille, Davis e Bobick, 1997; Kim et al., 2000; Figueroa, Leite e Barros, 2006b), uma vez que possibilitam a obtenção da posição de todos os jogadores em campo sem necessitar que os atletas portem algum instrumento. Assim, a análise dos deslocamentos dos jogadores, através destes métodos, deixa de ser restrita apenas às situações de treinamentos e amistosos e passa a ser realizada em jogos oficiais, pois não infringem as regras do esporte.

Com a utilização dos sistemas de rastreamento de jogadores, as primeiras variáveis quantificadas foram a distância percorrida total, distâncias percorridas por faixas de velocidade e análises de esforços de alta intensidade, comparadas entre as diferentes posições. Essas variáveis foram analisadas em jogos oficiais do campeonato brasileiro (Barros et al., 2007), espanhol (Di Salvo et al., 2007), inglês (Bradley et al., 2009; Di Salvo et al., 2009), entre outros. Além disso, estudos passaram a associar a posição dos jogadores em campo com as ações técnicas realizadas, tendo como objetivo diferenciar as exigências físicas do jogo, nas situações em que o jogador se encontrava com ou sem posse de bola (Rampinini et al., 2009), ou ainda de analisar as ações que levavam a ocorrência de chutes a gol (Moura et al., 2007).

Conforme observado, os estudos da literatura que utilizam sistemas de rastreamento têm voltado suas atenções principalmente para a realização de análises quantitativas do desempenho físico e técnico dos jogadores, porém a análise de variáveis táticas é raramente encontrada. Para o esporte, Barbanti (2003) refere-se à tática como procedimentos estratégicos mais adequados a certas tarefas ou situações que vão ser realizadas na competição ou no jogo. Assim, existe uma série de ações táticas individuais e coletivas, defensivas e ofensivas, que podem representar as estratégias de jogadores e equipes, conforme observado na figura 1.

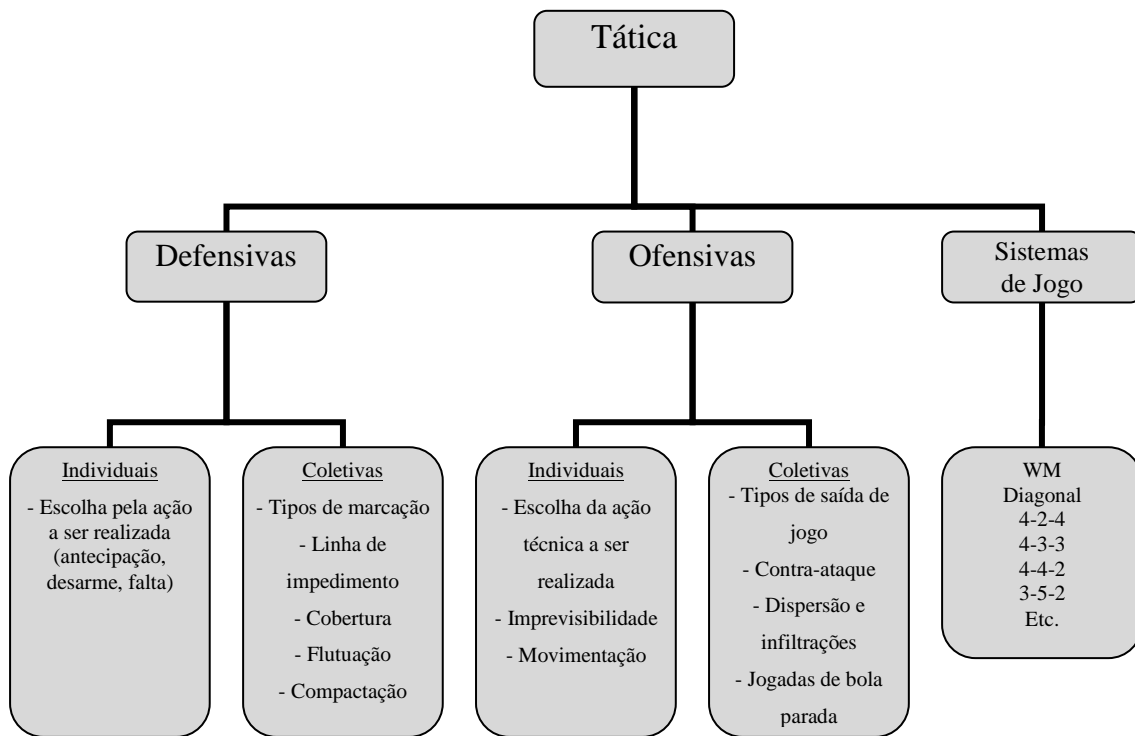


Figura 1. Representação de ações táticas do futebol (Cunha et al., 2011).

De acordo com a figura 1, algumas variáveis táticas coletivas estão relacionadas à organização das equipes em campo, como, por exemplo, o sistema de jogo utilizado durante uma partida ou competição. Barros et al. (2006) realizaram uma proposta de representação e análise das ações técnicas realizadas pelos jogadores através das componentes principais. Com esta representação, a identificação do sistema de jogo utilizado pela equipe pode ser realizada. Em outro estudo (Menezes et al., 2005), verificou-se que ao se identificar a posição de todos os jogadores em campo através de um sistema de rastreamento automático (Figuerola, Leite e Barros, 2006b; a), é possível realizar a representação do sistema de jogo sem a necessidade de processamento do jogo todo. Em outras palavras, os autores verificaram que aproximadamente 18 minutos (em média) são necessários para que se possa representar a região do campo que o jogador mais atuou naquele período.

Outros estudos também se preocuparam em analisar variáveis táticas de equipes de futebol durante jogos oficiais. Santana (2011), por exemplo, apresentou a representação das áreas de responsabilidade de cada jogador através do Diagrama de Voronoi, permitindo uma maior compreensão de como os jogadores de uma mesma equipe dividem a região do campo entre si. Alguns estudos também analisaram como jogadores dividem o espaço de campo entre

eles, porém estes estudos não apresentam dados quantitativos (Seabra e Dantas, 2006) ou limitam-se em avaliar jogos virtuais (Kim, 2004; Nakanishi et al., 2010).

Ainda conforme a figura 1 é possível constatar que algumas variáveis táticas estão relacionadas à dispersão e compactação de seus jogadores durante jogadas ofensivas e defensivas. Entende-se que uma equipe se encontra no ataque toda vez que possui a posse de bola e defendendo quando está sem posse de bola. Portanto, ao atacar, a equipe deve buscar manter a posse de bola, avançar em direção ao gol e seus jogadores devem se movimentar para espaços vazios do campo, visando receber a bola. Por outro lado, ao defender, as equipes buscam proteger seu próprio gol e recuperar a posse de bola do adversário (Mitchell, 1996).

Assim, a distribuição dos jogadores em campo enquanto atacam e defendem é um importante fator a ser analisado que ajuda a descrever algumas variáveis táticas adotadas por uma determinada equipe. Se as coordenadas bidimensionais dos jogadores são conhecidas, essa distribuição pode ser quantificada e analisada dinamicamente durante toda a partida. Uma das formas de se analisar como esses jogadores estão distribuídos é através do cálculo da área de ocupação da equipe, ou seja, o espaço do campo que a equipe cobre com seus jogadores, em cada instante de tempo de jogo (Frencken et al., 2011).

A área de ocupação de equipes de futebol durante dois jogos do campeonato japonês foi quantificada por Okihara et al. (2004). Para isso, os autores utilizaram a posição dos quatro jogadores mais próximos das linhas limítrofes do campo (exceto o goleiro) para definirem um quadrilátero e sua área foi adotada como a área de ocupação da equipe, conforme exemplificado na figura 2.

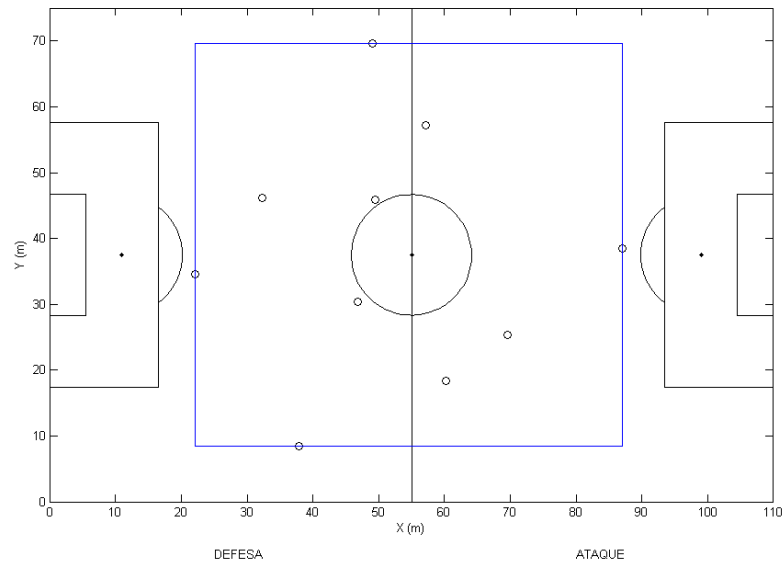


Figura 2. Representação da área de ocupação da equipe, conforme o método proposto por Okihara et al. (2004).

Conforme representado na figura 2, o método de quantificação proposto pelos autores utiliza apenas a posição de quatro jogadores em campo para representar sua organização. Desta forma, um método que leve em consideração a posição de um número maior de jogadores em campo para a determinação de sua área pode sofrer menos influência da posição de apenas um jogador na determinação da área, bem como representar melhor a ação de toda a equipe.

Outros estudos também avaliaram a variável área de ocupação em jogos reduzidos (Frencken e Lemmink, 2009; Frencken et al., 2011) de futebol (com quatro jogadores de linha para cada time) e no futsal (Moura et al., 2011). Contudo, os resultados podem não representar as mesmas características de jogos de futebol, ainda que alguns estudos (Frencken et al., 2011) considerem os jogos reduzidos como subfases do futebol.

Medidas de proximidade e afastamento entre os jogadores de uma mesma equipe representam, além da área de ocupação, a distribuição da equipe e caracterizam o espalhamento dos atletas em campo. Uma das medidas apresentadas na literatura consistiu em calcular a média das distâncias de cada jogador para o centro geométrico da equipe, em cada instante de tempo (Yue et al., 2008a). Com esta técnica, os autores mostraram que é possível se realizar análises específicas sobre a organização dos jogadores ao longo do jogo.

Muitos estudos na literatura têm procurado identificar diferentes padrões de jogo em equipes de futebol de diversas nacionalidades, a partir de dados relacionados às ações

técnicas realizadas, como número de chutes a gol, duração dos ataques, número de passes envolvidos em cada jogada de ataque, local de início e término da jogada de ataque, entre outros (Bate, 1988; Yamanaka, Hughes e Lott, 1993; Hughes e Churchill, 2005; Hughes e Franks, 2005). No entanto, nenhum destes trabalhos buscou analisar a área de ocupação e o espalhamento dos jogadores em campo como uma forma de se identificar características da organização de equipes de futebol. Portanto, quantificar estas variáveis ao longo da partida, nas situações em que os times se encontram com e sem posse de bola ou até mesmo em situações de desarmes e chutes a gol, podem acrescentar informações aos estudos da literatura sobre os padrões de jogo, antes obtidas apenas no âmbito das ações técnicas.

Além disso, com a quantificação destas variáveis, em função do tempo, séries temporais são obtidas que podem ser tratadas para a interpretação de como a distribuição dos jogadores de cada equipe evolui ao longo do jogo. Com estas análises, as características sobre a dinâmica do jogo e das equipes envolvidas podem ser descritas e, com isso, fornecer aos profissionais que atuam como técnicos e treinadores de futebol ferramentas que possibilitem um maior controle e análise da organização dos atletas em campo.

Portanto, parece ainda haver uma lacuna entre as informações táticas disponíveis a partir da quantificação da distribuição dos atletas em campo e o que realmente já foi apresentado na literatura. Além disso, nenhum estudo foi encontrado sobre as áreas de ocupação e o espalhamento de jogadores em campo com equipes brasileiras de futebol profissional. Desta forma, há questões que ainda precisam ser respondidas sobre organização dos jogadores em campo, dentre elas:

- Como equipes brasileiras dispõem seus jogadores quando estão com e sem posse de bola?
- Há diferenças na distribuição dos jogadores em campo que podem determinar o sucesso em efetuar desarmes (em situações defensivas) e chutes a gol (em situações ofensivas)?
- Como as séries temporais da área de ocupação e espalhamento se comportam ao longo da partida e quais informações sobre as características das equipes e do jogo podem ser obtidas através delas?

Visando responder a estas questões referentes a variáveis táticas envolvidas durante jogos de futebol, definiram-se os seguintes objetivos do presente estudo:

Objetivo geral:

- Analisar quantitativamente a distribuição de jogadores em campo, durante jogos oficiais de futebol profissional.

Objetivos específicos:

- Apresentar técnicas para a determinação da área de ocupação e o espalhamento de equipes de futebol em função do tempo;
- Analisar a área de ocupação e espalhamento de jogadores de equipes brasileiras, quando as mesmas se encontram com e sem posse de bola e em situações específicas de desarmes e finalizações;
- Analisar as séries temporais de espalhamento e área de ocupação de equipes de futebol em campo, a fim de descrever a distribuição dos jogadores em função do tempo de jogo.

A apresentação de todas as etapas realizadas na presente pesquisa está estruturada em três capítulos. No primeiro capítulo são descritos todos os procedimentos de coleta dos dados e apresentados como foram definidas e quantificadas a área de ocupação e o espalhamento dos jogadores em campo. Além disso, são demonstrados dados sobre simulações da influência de erros de medição nas variáveis descritas.

No segundo capítulo é apresentado um estudo sobre a quantificação da área de ocupação e espalhamento dos jogadores em campo, quando as equipes se encontravam com e sem posse de bola e em situações específicas de desarmes e chutes a gol.

Já no terceiro capítulo foi desenvolvido o estudo intitulado “Análise das séries temporais da área de ocupação e do espalhamento de jogadores de futebol em campo durante jogos oficiais”. Por fim, são apresentadas as conclusões a partir de todas as análises e resultados obtidos no presente estudo, bem como sugestões para estudos posteriores.

Capítulo 1 - Descrição de materiais e métodos, definição e descrição das variáveis de área de ocupação e espalhamento de jogadores em campo.

Neste capítulo estão apresentados em detalhes todos os procedimentos realizados durante as coletas dos dados analisados no presente estudo. São relatadas as etapas de filmagens dos jogos, rastreamento dos jogadores, a obtenção das coordenadas bidimensionais dos mesmos em função do tempo e sua suavização. Em seguida, são descritas como foram calculadas as áreas de ocupação e espalhamento das equipes ao longo dos jogos, e, por fim, uma simulação da influência de possíveis erros de medição nos valores das variáveis.

1.1 - Coleta de dados

Foram analisados neste estudo 10 jogos da primeira divisão de campeonatos nacionais de futebol profissional, realizados entre os anos de 2001 a 2008. Os dados coletados pertencem ao Laboratório de Instrumentação para Biomecânica, da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), e parte deste material foi utilizado em pesquisas anteriores.

Para facilitar a identificação, cada jogo foi rotulado como *jogo1*, *jogo2*, ..., *jogo10* e as equipes envolvidas como *tm1*, *tm2*, ..., *tm20*. Os jogos foram filmados por até seis câmeras digitais (30 Hz), posicionadas em locais altos dos estádios onde permaneceram fixas do começo ao fim do jogo. A descrição detalhada de cada equipe e o número de câmeras utilizadas em cada jogo encontra-se do Apêndice I. Cada câmera enquadrava aproximadamente um quarto do campo, com regiões de sobreposição entre elas. A figura 1.1 apresenta um exemplo de configuração do posicionamento das câmeras adotado para os jogos 5, 6, 7 e 8. Todas as imagens foram autorizadas pela emissora de televisão que detinha os direitos de imagens de todos os jogadores.

Após os jogos, as imagens foram transferidas para computadores na extensão “.avi” (*Audio Video Interleaved*), com resolução de 480 linhas por 720 colunas. Para seis jogos, a frequência das imagens foi reduzida para 7,5 Hz e, nos outros quatro jogos, manteve-se a frequência de 30 Hz. A partir de eventos de alta velocidade (como um chute) ocorridos nas

regiões de sobreposição das imagens, realizou-se o procedimento de sincronização das câmeras. A figura 1.2 apresenta as imagens obtidas durante a coleta de dados do *jogo1*.

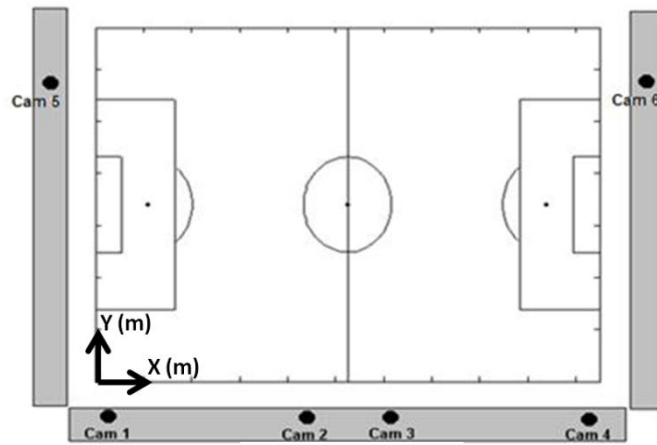


Figura 1.1. Sistema de coordenadas do campo (X,Y) e configuração da posição das câmeras de vídeo.



Figura 1.2. Enquadramento adotado pelas câmeras durante a coleta de dados do *jogo1*.

1.2 - Participantes e método de rastreamento automático

Nos 10 jogos analisados da presente pesquisa, foram obtidas as trajetórias de 277 jogadores por meio de um método de rastreamento, conforme descrito na tabela 1.1, que apresenta o número de jogadores rastreados e o ano de ocorrência de cada jogo. O Comitê de Ética em Pesquisa, da Universidade Estadual Paulista, *campus* de Rio Claro, aprovou este estudo.

Tabela 1.1. Descrição do número de jogadores rastreados, incluindo titulares e reservas, e o ano de ocorrência de cada jogo.

Jogos	Equipes envolvidas	Ano de ocorrência	Número de jogadores rastreados
Jogo 1	<i>tm1 x tm2</i>	2004	28
Jogo 2	<i>tm3 x tm4</i>	2003	28
Jogo 3	<i>tm5 x tm6</i>	2001	28
Jogo 4	<i>tm7 x tm8</i>	2003	28
Jogo 5	<i>tm9 x tm10</i>	2008	27
Jogo 6	<i>tm11 x tm12</i>	2008	28
Jogo 7	<i>tm13 x tm14</i>	2008	28
Jogo 8	<i>tm15 x tm16</i>	2008	28
Jogo 9	<i>tm17 x tm18</i>	2004	26
Jogo 10	<i>tm19 x tm20</i>	2004	28

O processo de medição consistiu em obter as coordenadas bidimensionais de cada jogador durante a sequência de imagens, através do *software* DVideo (Figuerola, Leite e Barros, 2003; Figuerola, Leite e Barros, 2006a; b). Esta medição pode ocorrer de forma manual ou automática. A medição manual ocorria quando o *software* não era capaz de identificar automaticamente o jogador de interesse ou quando identificava outro jogador erroneamente, o que ocorria, normalmente, em situações de oclusões ou quando havia muitos jogadores aglomerados. O sistema DVideo possui uma taxa de rastreamento automático de 94 % dos *frames* processados (Figuerola, Leite e Barros, 2006b).

A medição automática, por sua vez, envolve dois processos que possibilitam a identificação dos jogadores na imagem: a segmentação e o rastreamento automático. A segmentação tem como objetivo detectar e separar os elementos de interesse da imagem (no caso, os jogadores) de outros objetos irrelevantes, como placas de propaganda, torcedores, campo, etc. O sistema DVideo possui uma interface para o processo de segmentação que é configurada para cada jogo, de acordo as condições da coleta. O *software* considera o relevo topográfico definido pelo jogador em determinada região do campo através de uma série de procedimentos computacionais, editados na referida interface. Desse modo, são obtidas imagens binárias e as regiões conexas encontradas recebem o nome de *blobs*, conforme demonstrado na figura 1.3.

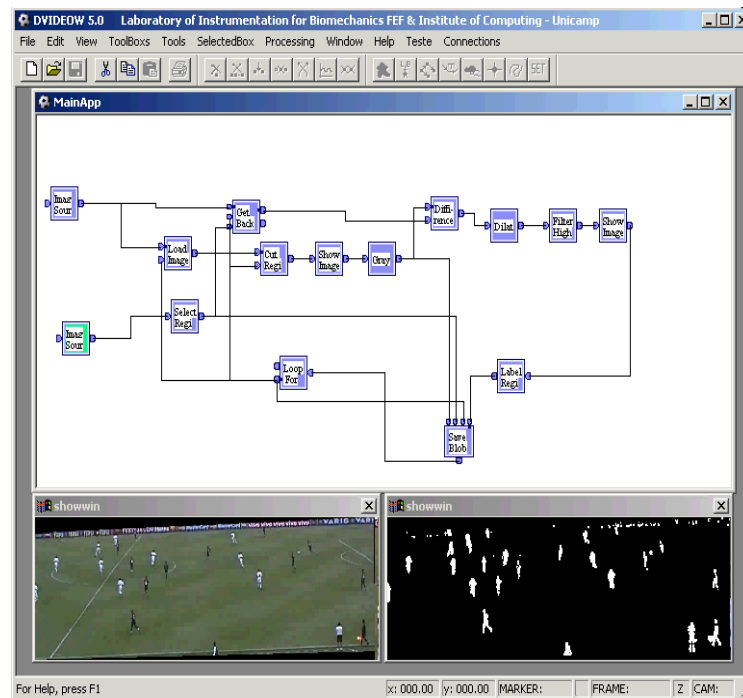


Figura 1.3. Interface do software DVideo que permite que algoritmos do processo de segmentação sejam editados e assim criados os *blobs*. O quadro superior apresenta cada um dos algoritmos editados no processo de segmentação e no quadro inferior estão os *blobs* obtidos para imagem ao lado.

Para associar as informações obtidas após o processo de segmentação à trajetória de cada jogador em campo, utilizou-se a teoria de grafos (Szwarcfiter, 1984). O grafo pode ser representado por um conjunto de pontos (chamados de vértices) que são conectados por linhas (nomeadas arestas). Neste trabalho, um vértice representa um ou mais *blobs* e dois pontos só poderão estar conectados por apenas uma aresta. De acordo com Szwarcfiter (1984), um grafo pode ser visualizado através de uma representação geométrica, na qual seus vértices correspondem a pontos distintos do plano em posições arbitrárias, enquanto cada aresta é associada a uma linha arbitrária unindo os pontos correspondentes. Construído então o grafo a partir desses dados, o rastreamento foi realizado para cada jogador separadamente, selecionando o atleta no primeiro quadro. Uma vez selecionado o primeiro vértice, o sistema buscou informações sobre o próximo ponto, de acordo com o grafo criado. A figura 1.4 apresenta o resultado do rastreamento de todos os jogadores durante uma determinada sequência de imagens.



Figura 1.4. Identificação da posição de cada jogador em campo ao longo de uma sequência de imagens.

Antes de cada jogo, foram obtidas através de uma trena as coordenadas de pontos específicos (figura 1.5) em relação ao sistema de coordenadas associado ao campo (figura 1.1). As projeções correspondentes destes pontos na imagem também foram determinadas no software DVideo. Deste modo, os parâmetros de homografia da transformação imagem-objeto foram calculados baseados no DLT (Direct Linear Transformation) proposto por (Abdel-Aziz e Karara, 1971), obtendo-se assim as coordenadas bidimensionais dos jogadores em relação ao sistema de coordenadas associado ao campo.

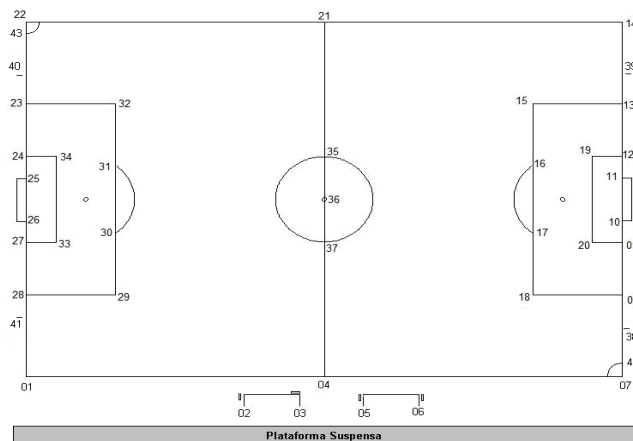


Figura 1.5. Pontos medidos no campo, utilizados para a homografia.

Em seguida, as coordenadas bidimensionais de cada jogador foram suavizadas através de um filtro digital passa-baixa Butterworth de 3ª ordem, com uma frequência de corte de 0,4 Hz. A frequência de corte foi determinada através de dois protocolos, conforme descrito em (Misuta, 2004). O primeiro protocolo consistiu em um teste dinâmico, no qual um participante percorria uma distância conhecida em campo, em diferentes velocidades (andando, trotando e correndo em alta velocidade). Após a aplicação de todos os procedimentos de rastreamento, as coordenadas 2D foram filtradas com diferentes frequências de corte. Após cada filtragem, calculava-se a distância percorrida pelo participante e a comparava com a distância real. Em um segundo protocolo, realizou-se uma análise dos resíduos (Cunha e Lima Filho, 2003), que confirmaram a boa escolha dos parâmetros.

Obtidas as coordenadas bidimensionais suavizadas de todos os jogadores em campo, foram identificadas e registradas as ações técnicas realizadas pelos atletas e calculadas a área de ocupação e o espalhamento das equipes em função do tempo. Com o objetivo de reduzir a quantidade de dados a ser processado e igualar as frequências das imagens nas diferentes coletas de dados, todas as variáveis de interesse foram calculadas a uma frequência de 7,5 Hz. Essa redução não causa nenhuma interferência nas séries temporais destas variáveis e nos valores de mediana e intervalos de confiança que serão apresentados nos resultados de cada análise realizada.

1.3 - Identificação e registro das ações técnicas

O *software* possui uma interface que possibilita o registro das ações técnicas realizadas pelos jogadores durante uma partida (Figura 1.6). Enquanto acompanha a sequências de imagens no *software* e uma ação é realizada por um jogador, o operador identifica em uma barra com o *mouse* qual ação foi realizada, o jogador que a realizou e o resultado da ação (certo ou errado). As ações e eventos do jogo registrados foram: domínio, passe, condução, drible, finalização, gol, desarme, falta, impedimento, cobrança de lateral e escanteio. Armazenadas estas informações para o jogo inteiro, um algoritmo foi criado em ambiente Matlab® para identificar todos os instantes de tempo em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola, bem como os momentos em que ocorreram ações específicas de desarmes e finalizações.



Figura 1.6. Interface do *software* DVideo utilizada para a identificação das ações técnicas realizadas pelos jogadores e outros eventos que ocorriam durante a partida.

1.4 - Descrição das variáveis analisadas: área de ocupação da equipe

A área de ocupação de uma determinada equipe está relacionada com as posições de cada jogador em campo. Uma forma de representação desta área de ocupação é por meio da área do envoltório convexo formado a partir da posição dos atletas. O envoltório convexo de um conjunto de pontos S no plano (neste caso, representado pela posição de cada jogador de uma mesma equipe, exceto o goleiro, em cada instante de tempo t) é o menor polígono convexo que contém S . Se S é finito, o envoltório convexo será sempre um polígono cujos vértices são um subconjunto de S (Preparata e Shamos, 1985).

Os pontos que formam os vértices do envoltório convexo, em cada instante de tempo, foram calculados através da técnica *Quickhull* (Preparata e Shamos, 1985; Barber, Dobkin e Huhdanpaa, 1996), disponível no *software* Matlab[®], cujas etapas podem ser resumidas da seguinte forma: dado um conjunto de pontos N no plano, determinam-se os extremos l e r e uma linha que passa entre eles é construída (figura 1.7-A). Seja S^l um subconjunto de pontos acima ou sobre a linha entre l e r ; S^r é similarmente definido como o conjunto de pontos abaixo ou sobre a mesma linha.

Cada etapa sucessiva é realizada tanto para S^l quanto para S^2 da seguinte maneira (na figura 1.7 estão demonstradas as etapas para S^l): determina-se um ponto $h \in S^l$ cujo triângulo (hlr) tenha a maior área entre todos os triângulos $\{(plr): p \in S^l\}$. Em seguida, são construídas duas linhas: L_1 direcionada de l para h e L_2 de h para r (figura 1.7-B). Cada ponto de S^l é então testado com respeito a cada uma dessas linhas: todos os pontos que estão à direita de L_1 e L_2 são eliminados e não podem ser vértices de S . Os pontos que estão à esquerda ou sobre L_1 formam um novo conjunto $S^{(l,1)}$ e os pontos à esquerda e sobre L_2 formam o novo conjunto $S^{(l,2)}$ (figura 1.7-B). Para esses novos conjuntos, são repetidos os mesmos processos para identificar o maior triângulo, traçar as novas linhas L_1 e L_2 e eliminar todos os pontos, sobrando apenas os vértices que irão compor S (figura 1.7-C). Realizado o mesmo processo para S^2 , forma-se então o envoltório convexo a partir do conjunto de pontos inicial (figura 1.7-D).

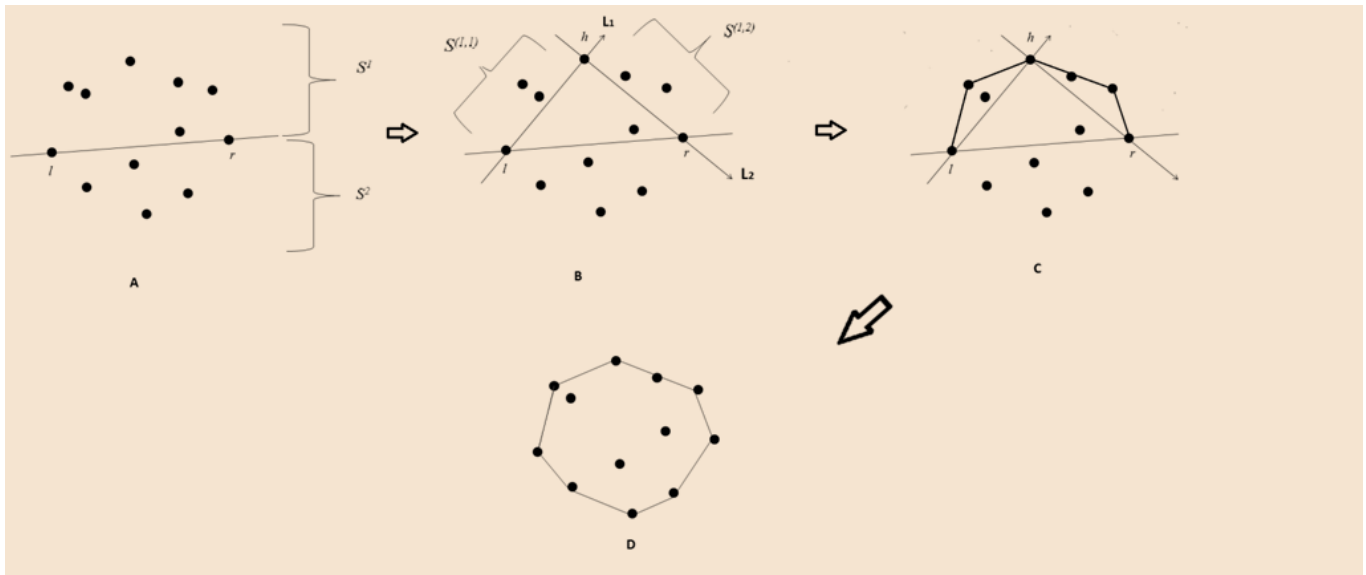


Figura 1.7. Representação da sequência de etapas para identificação dos vértices do envoltório convexo, através da técnica Quickhull.

Os envoltórios convexos formados para cada equipe foram computados durante toda a partida, a cada instante de tempo (figura 1.8-A). Em seguida, o envoltório convexo da equipe foi dividido em triângulos para o cálculo de sua área (figura 1.8-B). Desta forma, calculou-se a somatória da área de todos os triângulos e assim definiu-se a área de ocupação da equipe, conforme a figura 1.8-C.

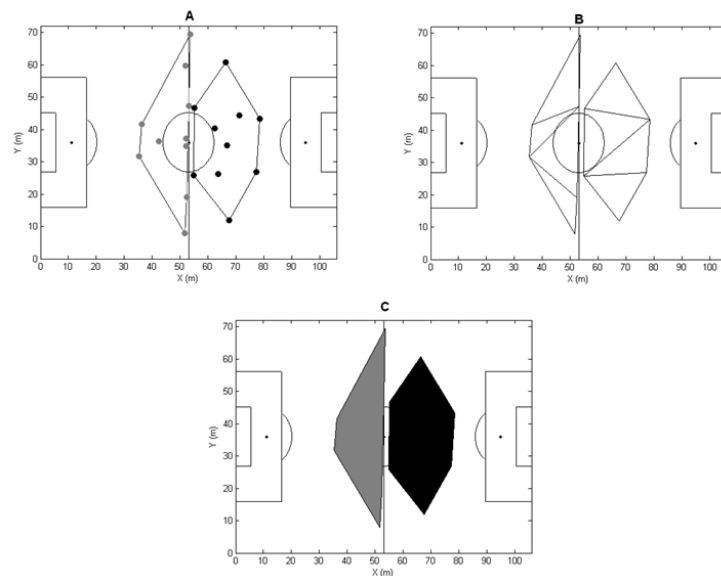


Figura 1.8. Representação do envoltório convexo de cada equipe (A), da triangulação de suas áreas (B) e da área de ocupação das equipes (C).

1.5 - Descrição das variáveis analisadas: espalhamento da equipe

Outra variável que será analisada na presente pesquisa é o espalhamento dos jogadores em campo em função do tempo. Assim, as distâncias entre os jogadores de uma mesma equipe podem fornecer informações sobre como a equipe está distribuída em campo. Portanto, para cada instante de tempo t , as distâncias euclidianas entre cada jogador e todos os seus companheiros de equipe foram calculadas (figura 1.9). Os valores de distância foram então organizados em uma matriz simétrica $D(t)$ de ordem n , onde $n = 10$, uma vez que foram considerados apenas os jogadores de linha. Se D é uma matriz simétrica, d_{ij} é igual a d_{ji} . Por exemplo, o elemento d_{12} é igual a d_{21} e representa a distância entre $p = 1$ e $p = 2$. Além disso, a diagonal principal é nula, pois a distância de um jogador para ele mesmo é zero. Desta forma, apenas os valores da matriz triangular inferior ou superior foram tratados. Por conveniência, utilizou-se a matriz triangular inferior L .

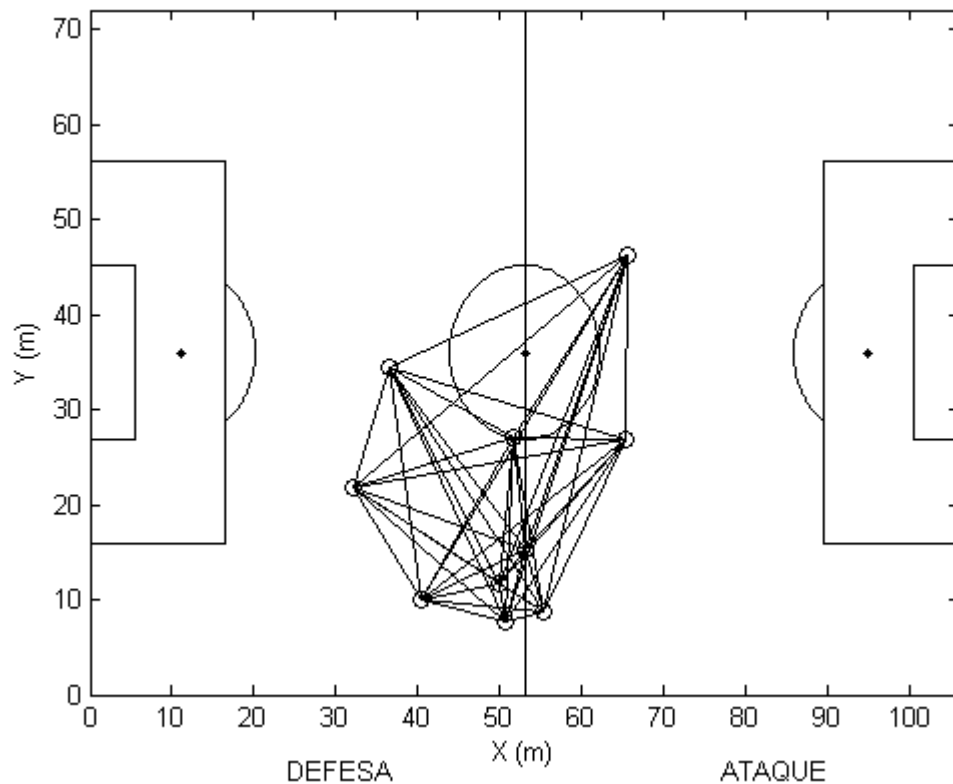


Figura 1.9. Representação das distâncias euclidianas entre cada jogador e todos os seus companheiros de equipe, em um determinado instante de tempo.

Em seguida, calculou-se a norma de Frobenius da matriz L , denominada $\|L\|_F$, em cada instante de tempo t . A norma de Frobenius é uma das normas matriciais mais

frequentemente utilizada em álgebra linear e fornece uma medida de distância (Golub e Van Loan, 1989). Assim, a norma de Frobenius pode ser definida como a raiz quadrada de todos os valores absolutos de seus elementos elevados ao quadrado, conforme a equação abaixo:

$$\|L(t)\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |l_{ij}|^2} \quad (1.1)$$

Algumas propriedades da norma de matrizes são especialmente importantes para a aplicação desse conceito na presente análise:

1. $\|L\| > 0$ quando $L \neq 0$ e $\|L\| = 0$ se e somente se $L = 0$,
2. $\|\alpha L\| = |\alpha| \|L\|$ para qualquer escalar α .

Portanto, a não ser que as distâncias entre todos os jogadores sejam iguais à zero (uma situação impossível no futebol), a norma de Frobenius será sempre diferente de zero. Além disto, se, por exemplo, as distâncias entre os jogadores dobrarem, a norma de Frobenius dobra também.

A norma de Frobenius da matriz L , calculada a cada instante de tempo t , representou o espalhamento da equipe durante o jogo. Assim, de acordo com a fórmula apresentada, maiores valores da norma de Frobenius representam que os jogadores estão mais espalhados pelo campo. Por outro lado, menores valores representam que os jogadores estão adotando uma estrutura mais compacta.

1.6 - Valores máximos de área de ocupação e espalhamento

Para uma melhor compreensão dos resultados de área de ocupação e espalhamento das equipes analisadas no presente estudo, realizou-se uma projeção de quais seriam os valores máximos para cada uma dessas variáveis. Uma vez que os jogos foram realizados em estádios diferentes, para cada jogo estes valores máximos podem se alterar, dado que estas variáveis sofrem influência direta das dimensões do campo.

Para a área de ocupação, o valor máximo que pode ocorrer durante uma partida nada mais é que a própria área do campo. Assim, ao se obter a área total do campo é possível se descrever, por exemplo, o quanto a área de ocupação da equipe representa, em percentual, da área do campo de futebol em que a partida foi realizada. Desta forma, a tabela 1.2 apresenta as

dimensões de cada campo em que os jogos ocorreram e quais seriam os possíveis valores máximos de área de ocupação de uma equipe, ou seja, as áreas do campo de cada estádio.

Já para a variável de espalhamento, matematicamente, o valor máximo para 10 pontos ocorre quando cinco pontos estão posicionados no vértice que compõe um dos escanteios do campo e os outros cinco pontos estão posicionados no vértice do escanteio não adjacente (vide demonstração no Anexo I). Os resultados destes valores máximos de espalhamento encontrados, para cada dimensão dos campos em que os jogos foram realizados, também se encontram na tabela 1.2. Cabe ressaltar que estes valores máximos, tanto de área de ocupação quanto de espalhamento, são valores de referência e não ocorrem durante uma partida de futebol.

Tabela 1.2. Descrição das dimensões de cada campo e os valores máximos possíveis para as variáveis de espalhamento e área de ocupação.

Jogo	Equipes envolvidas	Estádio em que o jogo foi realizado	Dimensões do campo (comp. x larg.) em metros	Valores máximos de área de ocupação (m ²)	Valores máximos de espalhamento (m)
Jogo 1	<i>tm1 e tm2</i>	Estádio Urbano Caldeira (Vila Belmiro)	106 x 72	7632	640,7
Jogo 2	<i>tm3 e tm4</i>	Est. Mun. Paulo M. de Carvalho (Pacaembu)	104 x 70,5	7332	628,2
Jogo 3	<i>tm5 e tm6</i>	Estádio Brinco de Ouro da Princesa	111 x 80	8880	684,1
Jogo 4	<i>tm7 e tm8</i>	Estádio Cícero P. de Toledo (Morumbi)	107 x 73	7811	647,6
Jogo 5	<i>tm9 e tm10</i>		105 x 68	7140	625,5
Jogo 6	<i>tm11 e tm12</i>	Estádio Joaquim Américo Guimarães (Arena da Baixada)	105 x 68	7140	625,5
Jogo 7	<i>tm13 e tm14</i>		105 x 68	7140	625,5
Jogo 8	<i>tm15 e tm16</i>		105 x 68	7140	625,5
Jogo 9	<i>tm17 e tm18</i>	Estádio Cícero P. de Toledo (Morumbi)	107 x 73	7811	647,6
Jogo 10	<i>tm19 e tm20</i>	Estádio Cícero P. de Toledo (Morumbi)	107 x 73	7811	647,6

1.7 - Simulações de mudanças nas posições dos jogadores e suas influências nas variáveis analisadas

O principal objetivo desta etapa foi realizar uma série de mudanças nas posições dos jogadores, em cada instante de tempo de uma partida, para verificar como possíveis erros na determinação da posição dos atletas podem influenciar nas variáveis de área de ocupação e espalhamento da equipe. Este procedimento foi realizado pelo fato de que o software DVideo possui um erro médio de 0,3 m na determinação de posição neste tipo de experimento, conforme descrito em Misuta (2004).

Desta forma, para cada *frame* de uma partida inteira, realizou-se 500 simulações de mudanças nas posições dos jogadores. Para isto, em cada simulação, foram somadas às coordenadas não suavizadas x e y dos atletas um valor aleatório (k_1 e k_2 , respectivamente) pertencente a uma distribuição normal $N(\mu; \sigma)$, onde μ representa a média e σ o valor de desvio-padrão. A criação de valores aleatórios foi realizada através da função “mvnrnd.m”, disponível pelo *software* Matlab®.

Como durante as medições o erro de determinação da posição pode ser maior que 0,3 m, as mudanças provocadas nas posições dos jogadores foram superestimadas em relação a este valor. Assim, a posição de cada jogador após cada simulação (p_s), em cada instante de tempo t , pode ser definida da seguinte forma:

$$p_s(t) = \{x(t) + k_1, y(t) + k_2\} \quad (1.2)$$

Sendo,

$s = 1, 2, \dots, 500$.; representando cada simulação;

$x(t)$ = coordenada x não suavizada do jogador no instante de tempo t ;

$y(t)$ = coordenada y não suavizada do jogador no instante de tempo t ;

k_1 e $k_2 \in N(\mu; \sigma)$, onde $\mu = 0$ e $\sigma = 0,4$.

Após cada simulação, calculou-se a área de ocupação e espalhamento da equipe com as coordenadas alteradas e, em seguida, calculou-se o valor absoluto da diferença entre os valores simulados das variáveis e valor observado após a medição, conforme exemplificado nas fórmulas 1.3 e 1.4 para a área de ocupação ($DifA$) e espalhamento ($DifE$), respectivamente.

$$DifA_s(t) = |A(t) - A_s(t)| \quad (1.3)$$

$$DifE_s(t) = |E(t) - E_s(t)| \quad (1.4)$$

Sendo,

$s = 1, 2, \dots, 500$.; representando cada simulação de alteração das coordenadas dos jogadores;

$A(t)$ = área de ocupação da equipe no instante de tempo t , obtida a partir das coordenadas não suavizadas x e y dos atletas;

$A_s(t)$ = área de ocupação da equipe no instante de tempo t , obtida a partir das coordenadas x e y dos atletas, alteradas após a simulação s .

$E(t)$ = espalhamento da equipe no instante de tempo t , obtido a partir das coordenadas não suavizadas x e y dos atletas;

$E_s(t)$ = espalhamento da equipe no instante de tempo t , obtido a partir das coordenadas x e y dos atletas, alteradas após a simulação s .

A figura 1.10-A apresenta um exemplo da área de ocupação dos atletas, obtidas a partir das coordenadas não suavizadas dos atletas e outras três áreas de ocupação após as simulações de mudanças nas coordenadas dos atletas. Na figura 1.10-B, ampliou-se apenas a região do campo onde foram traçados os envoltórios, para uma melhor visualização.

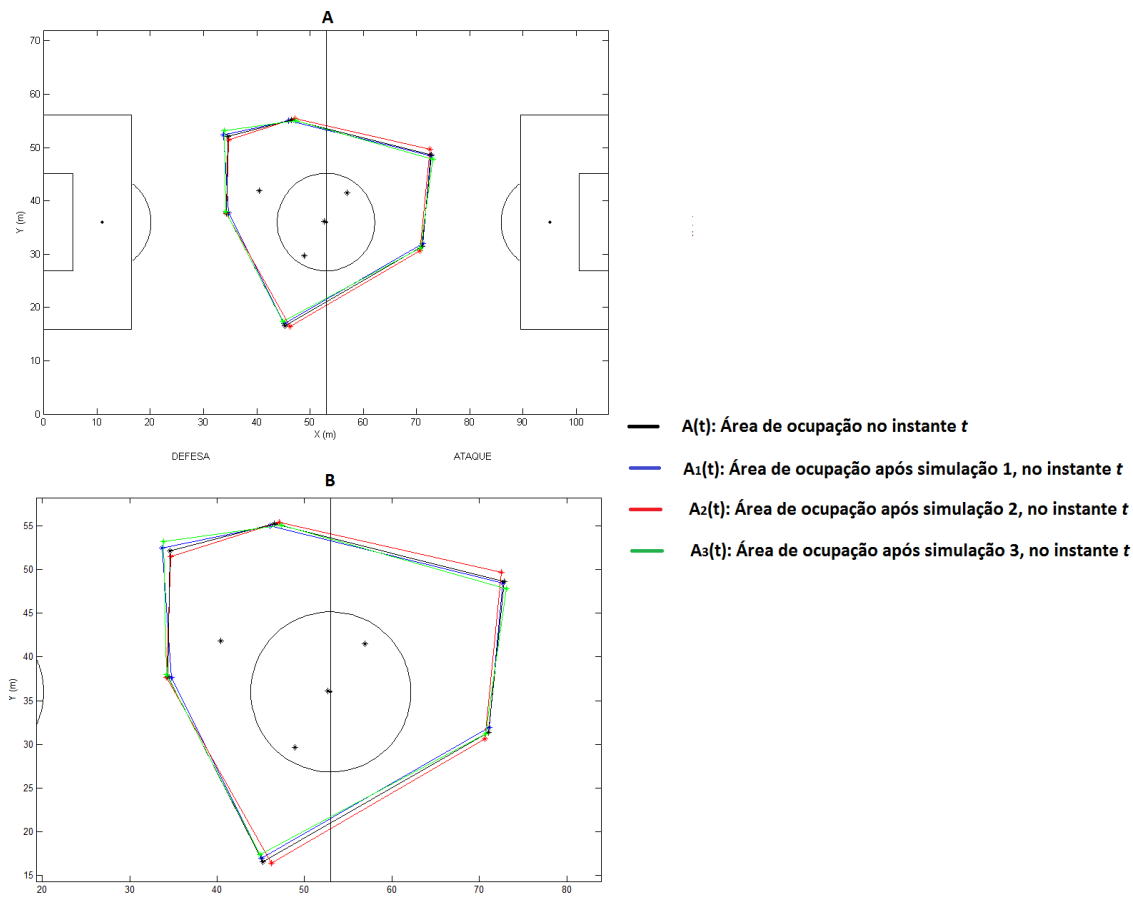


Figura 1.10. Representação da área de ocupação de uma equipe em um determinado instante de tempo t e as áreas de ocupação da mesma equipe após três simulações de alterações nas coordenadas x e y dos atletas.

As simulações apresentaram uma diferença média (\pm desvio padrão) de $22,78 \pm 0,10 \text{ m}^2$ e $1,67 \pm 0,01 \text{ m}$ para a área de ocupação e espalhamento, respectivamente. Como estas simulações foram realizadas a partir dos dados das coordenadas não suavizadas de *tml*, estas diferenças médias para cada variável, normalizadas pelos valores máximos, representam respectivamente 0,30 % da área de ocupação máxima e 0,26 % do espalhamento máximo para o jogo 1. Desta forma, a área de ocupação é uma variável que parece sofrer maior influência de erros de medição, quando comparada à medida de espalhamento. No entanto, é possível verificar que, para o fenômeno que será analisado, ambas as variáveis se mostram consistentes e pouco sensíveis a possíveis erros de medição.

Conhecidas as variáveis que serão utilizadas para a análise da distribuição dos jogadores de futebol em campo e suas propriedades, dois estudos foram realizados, que serão apresentados nos capítulos a seguir.

Capítulo 2: Análise quantitativa da distribuição de jogadores de futebol brasileiro em campo.

2.1 - Introdução

A análise objetiva de um determinado esporte exige o desenvolvimento de metodologias para a aquisição de informações relacionadas às ações dos jogadores durante a competição, para avaliar assim as características físicas, técnicas e táticas do jogo. A evolução tecnológica tem levado ao desenvolvimento de sistemas de rastreamento de jogadores que fornecem dados das trajetórias dos atletas em campo (Carling et al., 2008). Estes sistemas têm sido amplamente utilizados para quantificar as demandas físicas de jogadores de futebol dos mais diversos campeonatos, em diferentes nacionalidades (Barros et al., 2007; Di Salvo et al., 2007; Bradley et al., 2009; Di Salvo et al., 2009).

Comparado ao número de estudos na literatura que lidam com as exigências físicas de jogadores de futebol, pesquisas com análises táticas são limitadas. No futebol, quando uma equipe ataca, os jogadores devem resolver problemas táticos complexos de como manter a posse de bola, avançar em direção ao gol e se mover para regiões vazias do campo para criar oportunidades de gol. Por outro lado, quando defendem, os jogadores devem se mover para proteger o gol e recuperar a posse de bola novamente (Mitchell, 1996). Portanto, a organização dos jogadores em campo pode explicar táticas importantes do jogo, e a troca da posse de bola entre as equipes pode causar alterações nesta distribuição.

A área de ocupação e o espalhamento são duas importantes variáveis que podem ser analisadas para compreender a organização dos jogadores durante um jogo de futebol e podem representar indicadores de desempenho tático (Garganta, 1997; Hughes e Bartlett, 2002; Frencken e Lemmink, 2009). No entanto, apenas três estudos foram encontrados na literatura que apresentam dados quantitativos sobre estas variáveis. A área de ocupação foi analisada por Okihara et al. (2004) em dois jogos de futebol do campeonato japonês. Porém, os autores definiram a área do time a partir da posição de apenas quatro jogadores da equipe. Um estudo recente também analisou a área de ocupação de equipes durante jogadas de ataque (Frencken e Lemmink, 2009), mas esta análise foi aplicada apenas para dois jogos reduzidos (com quatro jogadores para cada equipe), o que pode não representar as reais situações de um jogo oficial de futebol de alto nível. Por fim, Yue et al. (2008a) apresentaram como medida de espalhamento o

raio instantâneo de cada equipe (definido como a distância média entre todos os jogadores e o centro geométrico do time) para quantificar suas organizações táticas quando se encontrava com e sem posse de bola. Os autores apresentaram resultados apenas de um período de jogo do campeonato alemão.

Conforme observado, os estudos que analisaram a distribuição dos jogadores em campo utilizaram amostras pequenas e nenhuma pesquisa avaliou equipes brasileiras. Com base em dados sobre a frequência de passes, chutes a gol, cruzamentos e outras ações técnicas, Yamanaka, Hughes e Lott (1993) mostraram que equipes sul-americanas possuem um padrão de jogo diferente de equipes de outras nacionalidades. Porém, nenhuma informação sobre a distribuição dos atletas em campo foi apresentada.

Durante situações específicas do jogo, a organização da equipe pode mudar como consequência de uma perturbação, como a perda de posse de bola ou a ocorrência de um gol (Frencken e Lemmink, 2009). Desta forma, a análise da área de ocupação e do espalhamento de uma equipe, durante situações de desarmes e finalizações a gol podem fornecer importantes informações táticas. Enquanto se defende, espera-se que uma equipe apresente uma organização diferente em campo quando realiza um desarme comparada aos momentos em que a mesma sofre uma finalização. Por outro lado, em situações de ataque, a equipe pode apresentar uma organização em campo no momento da finalização diferente de quando sofre um desarme.

Com a obtenção das posições dos jogadores de futebol em campo em função do tempo através de sistemas de rastreamento, quantificações da área de ocupação e espalhamento de equipes podem ser realizadas. Para uma melhor compreensão da dinâmica do jogo, é necessário entender como estas variáveis mudam ao longo do jogo, enquanto as equipes atacam e defendem. Além disto, uma análise específica destas variáveis em situações de desarmes e finalizações a gol podem fornecer subsídios para que técnicos aprimorem os programas de treinamento e, conseqüentemente, o desempenho da equipe na competição.

Portanto, o objetivo deste estudo foi analisar a área de ocupação e espalhamento em campo de equipes brasileiras enquanto atacam e defendem e em situações de desarmes e finalizações a gol. Especificamente, buscou-se verificar se as equipes enquanto defendem apresentam uma organização diferente em campo que possibilite às mesmas realizarem o desarme e não sofrerem uma finalização. Da mesma forma, buscou-se analisar se as equipes,

enquanto atacam, possuem uma organização diferente em campo nas situações em que as mesmas conseguem finalizar, comparadas às situações em que sofrem desarmes.

2.2 - Métodos

Coleta de dados

O comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Estadual Paulista aprovou este estudo. Oito jogos do campeonato brasileiro de futebol foram filmados por pelo menos quatro câmeras digitais, realizados entre 16 diferentes equipes. Para facilitar a identificação, as equipes foram rotuladas como $tm1$, $tm2$, ..., $tm16$. As câmeras foram fixadas em locais altos dos estádios, cada uma enquadrando aproximadamente um quarto do campo, com regiões de sobreposição entre elas. Após os jogos, as imagens foram transferidas para computadores e as câmeras foram sincronizadas identificando-se eventos comuns que ocorriam nestas regiões de sobreposição, como, por exemplo, o exato momento de um chute.

Participantes e método de rastreamento

Através de um sistema de rastreamento automático de jogadores via *software* DVideo (Figueroa, Leite e Barros, 2006a; b), foram obtidas as trajetórias de 223 jogadores em oito jogos. O *software* DVideo possui uma taxa de 94% de rastreamento automático para os *frames* processados, um erro médio de 0,3 m na determinação da posição e um erro médio de 1,4% na determinação da distância percorrida pelo atleta (Figueroa, Leite e Barros, 2006b; Misuta, 2009).

Cada jogador, de cada time, foi numerado como $p = 1, 2, \dots, 11$. Assim, as coordenadas 2D dos jogadores foram definidas como $p(Xp(t), Yp(t))$, onde t representa cada instante de tempo (em segundos). Em seguida, um filtro digital passa-baixa Butterworth de 3ª ordem, com uma frequência de corte de 0,4 Hz suavizou as coordenadas bidimensionais de todos os jogadores. Obtidas as trajetórias suavizadas, foram calculadas a área de ocupação e o espalhamento das equipes em função do tempo.

Posse de bola

Com as coordenadas 2D de todos os jogadores, foram registradas as ações técnicas realizadas, também através do software DVideo. Ao final deste processo, uma matriz é criada, onde são armazenadas as informações de quais ações foram realizadas, o instante de tempo em que estas ações ocorreram e as coordenadas 2D dos jogadores enquanto as realizavam. Com esta informação, um algoritmo foi criado em ambiente Matlab® para identificar os momentos em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola, bem como situações de desarmes e finalizações a gol.

Neste estudo, foi considerado que uma equipe recuperava a posse de bola quando duas ações consecutivas eram realizadas pelo mesmo jogador ou duas ações eram realizadas por dois jogadores diferentes. Assim, de acordo com este critério, uma equipe não perdia a posse de bola quando o oponente realizava uma falta ou um desarme incompleto e a bola retornava à equipe. Além disso, mesmo quando o jogo se encontrava parado, a posse de bola era atribuída à equipe que realizaria a próxima ação. Este critério foi adotado por se considerar que, mesmo quando a bola se encontra fora de jogo, as equipes já se organizam em campo em função de estarem com ou sem a posse de bola na próxima ação.

A partir destes dados, foram analisadas as áreas de ocupação e espalhamento das equipes enquanto atacavam e defendiam (em outras palavras, quando estavam com e sem posse de bola) e em situações de finalizações a gol e desarmes. Para reduzir a quantidade de dados a serem processados e igualar as frequências das sequências de imagens, para todos os jogos, a área de ocupação e espalhamento foram analisadas a uma frequência de 7,5 Hz.

Espalhamento da equipe

Para cada instante de tempo t , as distâncias euclidianas entre cada jogador e todos os seus companheiros de equipe foram calculadas. Os valores de distância foram então organizados em uma matriz simétrica $D(t)$ de ordem n , onde $n = 10$, uma vez que foram considerados todos os jogadores, exceto o goleiro. Obtida a matriz triangular inferior $L(t)$ de $D(t)$, calculou-se a norma de Frobenius e o valor encontrado representou o espalhamento da equipe no instante t . Assim, maiores valores da norma de Frobenius da matriz L caracterizam jogadores mais espalhados pelo campo enquanto menores valores representam jogadores mais próximos uns dos outros.

Área de ocupação da equipe

A área de ocupação da equipe foi representada pela área do envoltório convexo calculado a partir da posição dos jogadores de linha de uma mesma equipe. Os vértices do envoltório foram identificados a cada instante de tempo t através da técnica *Quickhull* (Barber, Dobkin e Huhdanpaa, 1996), disponível no *software* Matlab®. Em seguida, o envoltório convexo da equipe foi dividido em triângulos, suas áreas foram calculadas e somadas, representando assim a área de ocupação da equipe.

Situações de finalizações e desarmes

Foram analisadas as áreas de ocupação e espalhamentos das equipes em 233 situações de finalizações e 1897 situações de desarmes. Enquanto defendia, a área de ocupação e o espalhamento eram identificados no exato momento em que a equipe realizava um desarme ou sofria uma finalização. Da mesma forma, enquanto atacava, identificavam-se estas variáveis no exato momento em que a equipe realizava uma finalização ou sofria um desarme.

Análises estatísticas

Para todas as análises estatísticas, adotou-se $p < 0,05$. Antes de cada análise, o teste de normalidade *Lilliefors* verificou se os dados possuíam distribuição normal. Como em todos os testes não foram encontradas normalidades dos dados, foram utilizados testes não paramétricos nas análises estatísticas seguintes.

O teste de Wilcoxon foi realizado para a comparação dos valores das variáveis (área de ocupação e espalhamento) quando as equipes se encontravam com e sem posse de bola. Estes valores foram apresentados em medianas \pm intervalos de confiança (CI), calculados conforme descrito por McGill e colaboradores (McGill, Tukey e Larsen, 1978). Além disso, o teste Spearman de correlação de postos testou a relação entre as medidas de espalhamento e área de ocupação das equipes.

O teste de independência Qui-quadrado avaliou se o fato da equipe apresentar maiores valores de área e espalhamento que seu adversário estava relacionado à posse de bola. Os valores foram expressos em número de *frames* e porcentagem do número total de *frames* do jogo

em que cada equipe possuía maiores valores que seus adversários e se encontrava com e sem posse de bola.

Por fim, a área de ocupação e o espalhamento da equipe foram analisados nas situações de finalizações e desarmes. Desta forma, foi avaliado se, enquanto defendia, a equipe apresentava valores diferentes de área e espalhamento quando desarmes eram realizados e quando sofriam finalizações. Para isto, aplicou-se o teste de Wilcoxon. Enquanto atacava, foram analisados os valores destas variáveis quando as equipes conseguiam finalizar ou quando sofriam desarmes. Novamente o teste de Wilcoxon foi aplicado e os valores foram expressos em medianas \pm CI.

2.3 - Resultados

A figura 2.1 apresenta exemplos das séries temporais da área de ocupação (A) e espalhamento (B) de *tm1* and *tm2* durante 10 minutos do primeiro tempo de jogo. Visualmente, as séries temporais de ambas as variáveis apresentam uma relação “em fase”. Um comportamento similar foi encontrado durante todo o tempo de jogo, para todas as partidas analisadas.

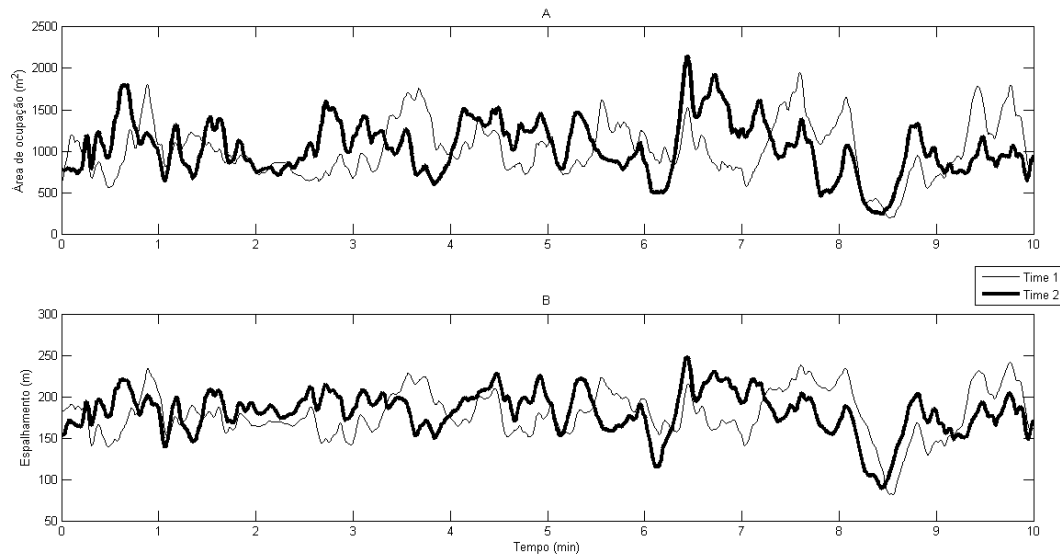


Figura 2.1. Área de ocupação e espalhamento das equipes *tm1* e *tm2* durante 10 minutos de jogo.

Já a figura 2.2 mostra um exemplo das áreas de ocupação e espalhamentos de ambas as equipes durante uma troca de posse de bola. É possível verificar que, quando uma equipe perde a posse de bola, a área de ocupação e o espalhamento diminuem. Por outro lado, quando a equipe ganha a posse de bola, estes valores aumentam.

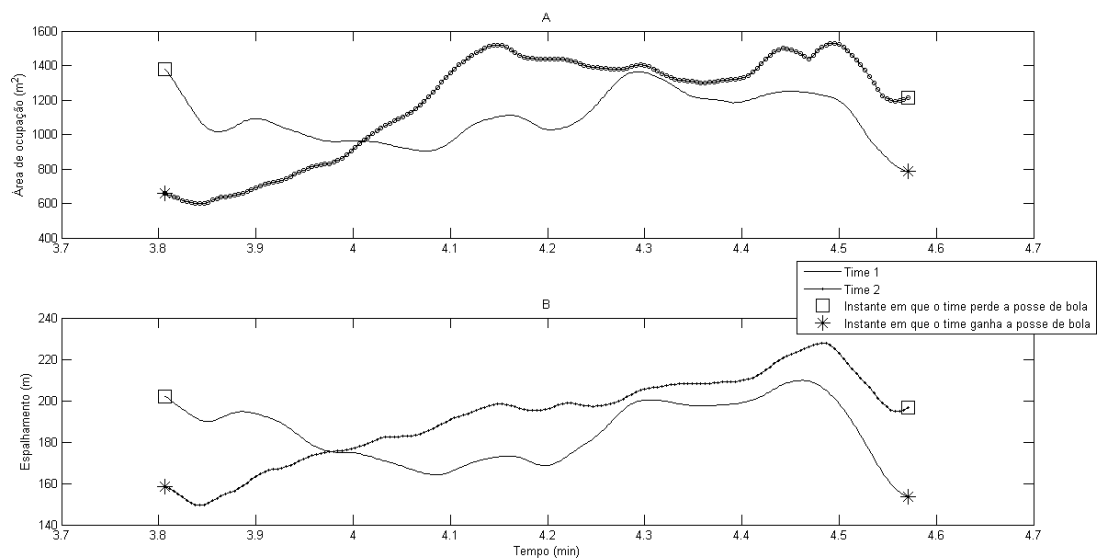


Figura 2.2. Área de ocupação (A) e espalhamento (B) das equipes durante uma troca de posse de bola.

A tabela 2.1 confirma os resultados da figura 2.2 para todas as equipes durante todos os jogos. O teste de Wilcoxon mostrou que todas as equipes apresentam maiores valores de espalhamento e área quando estão com posse de bola, comparadas a situações em que se encontram sem posse de bola. Os valores destas variáveis, normalizados pelos valores máximos possíveis para cada jogo conforme descrito na tabela 1.2, estão apresentados no Apêndice II. Para cada equipe, também foram testadas as correlações entre a área de ocupação e o espalhamento (tabela 2.2). O teste de Spearman confirmou que há uma correlação positiva e significativa entre estas variáveis, para todas as equipes analisadas.

Tabela 2.1. Área de ocupação (m²) e espalhamento (m) de todas as equipes analisadas, nas condições em que as mesmas se encontravam com e sem posse de bola.

Times	Espalhamento (m)				Área de ocupação (m²)				Resultado do jogo
	Com posse		Sem posse		Com posse		Sem posse		
	Mediana	IC	Mediana	IC	Mediana	IC	Mediana	IC	
tm1	192,7*	0,3	174,2	0,4	1114,0*	4,0	961,5	4,2	tm1 2 x 1 tm2
tm2	188,5*	0,4	177,4	0,3	1095,3*	6,1	943,2	3,6	
tm3	190,4*	0,3	180,8	0,4	1127,4*	4,3	1009,3	4,0	tm3 1 x 0 tm4
tm4	183,2*	0,4	168,7	0,4	1068,2*	4,8	878,1	3,9	
tm5	214,6*	0,4	197,3	0,5	1407,6*	5,5	1158,4	5,5	tm5 1 x 2 tm6
tm6	201,7*	0,5	184,2	0,3	1257,3*	5,4	1015,4	4,0	
tm7	198,1*	0,4	180,7	0,4	1210,8*	5,0	990,3	5,1	tm7 3 x 1 tm8
tm8	193,4*	0,4	182,7	0,4	1169,3*	4,9	1032,9	4,4	
tm9	181,4*	0,4	170,2	0,4	985,3*	4,4	867,6	3,3	tm9 1 x 1 tm10
tm10	175,0*	0,4	164,7	0,4	967,6*	4,0	813,9	3,6	
tm11	183,9*	0,4	168,4	0,4	1031,3*	4,4	862,1	3,6	tm11 1 x 1 tm12
tm12	177,3*	0,4	166,3	0,4	976,2*	4,8	809,9	4,3	
tm13	182,6*	0,4	162,0	0,3	1033,2*	4,5	805,5	3,4	tm13 0 x 3 tm14
tm14	177,4*	0,4	166,6	0,4	986,5*	3,8	845,2	3,5	
tm15	181,6*	0,4	168,1	0,4	976,2*	4,0	858,5	3,9	tm15 1 x 2 tm16
tm16	171,1*	0,4	159,6	0,4	905,4*	4,4	773,8	4,6	

*p<0,05, maiores valores que os dados da coluna “sem posse de bola”, para a mesma variável.

Tabela 2.2. Coeficientes de correlação (ρ) entre a área de ocupação e espalhamento de cada equipe.

	Time	ρ	Time	ρ
Jogo 1	<i>tm1</i>	0,90*	<i>tm2</i>	0,91*
Jogo 2	<i>tm3</i>	0,88*	<i>tm4</i>	0,92*
Jogo 3	<i>tm5</i>	0,88*	<i>tm6</i>	0,89*
Jogo 4	<i>tm7</i>	0,92*	<i>tm8</i>	0,93*
Jogo 5	<i>tm9</i>	0,85*	<i>tm10</i>	0,99*
Jogo 6	<i>tm11</i>	0,89*	<i>tm12</i>	0,89*
Jogo 7	<i>tm13</i>	0,91*	<i>tm14</i>	0,87*
Jogo 8	<i>tm15</i>	0,90*	<i>tm16</i>	0,93*

* $p < 0,05$

Quando as variáveis de área de ocupação e espalhamento são analisadas para ambas as equipes em função do tempo, informações podem ser extraídas sobre qual das equipes apresentava maiores valores que seu adversário, em cada instante de tempo. As tabelas de contingência 2.3 e 2.4 mostram a frequência com que cada equipe apresentou maiores valores de área e espalhamento que o oponente, respectivamente, nas situações em que se encontrava com e sem posse de bola.

Tabela 2.3. Tabela de contingência para o número de *frames* em que cada equipe apresentou maiores valores de área de ocupação que seu adversário, quando se encontrava com e sem posse de bola.

Jogos	Área de ocupação	Número de <i>frames</i> (Porcentagem de <i>N</i>)	
		Com posse de bola	Sem posse de bola
Jogo 1 (<i>N</i> = 41441)	<i>tm1</i> > <i>tm2</i>	17820 (43.0 %)	6423 (15.5 %)
	<i>tm2</i> > <i>tm1</i>	11106 (26.8 %)	6092 (14.7 %)
Jogo 2 (<i>N</i> = 43568)	<i>tm3</i> > <i>tm4</i>	19039 (43.7 %)	8104 (18.6 %)
	<i>tm4</i> > <i>tm3</i>	11981 (27.5 %)	4444 (10.2 %)
Jogo 3 (<i>N</i> = 41922)	<i>tm5</i> > <i>tm6</i>	19452 (46.4 %)	8049 (19.2 %)
	<i>tm6</i> > <i>tm5</i>	10564 (25.2 %)	3857 (9.2 %)
Jogo 4 (<i>N</i> = 41678)	<i>tm7</i> > <i>tm8</i>	14254 (34.2 %)	7044 (16.9 %)
	<i>tm8</i> > <i>tm7</i>	14587 (35.0 %)	5793 (13.9 %)
Jogo 5 (<i>N</i> = 43296)	<i>tm9</i> > <i>tm10</i>	16363 (37.8 %)	7390 (17.1 %)
	<i>tm10</i> > <i>tm9</i>	13617 (31.4 %)	29441 (13.7 %)
Jogo 6 (<i>N</i> = 42726)	<i>tm11</i> > <i>tm12</i>	15688 (36.7 %)	7912 (18.5 %)
	<i>tm12</i> > <i>tm11</i>	15729 (36.8 %)	3397 (8.0 %)
Jogo 7 (<i>N</i> = 41803)	<i>tm13</i> > <i>tm14</i>	14577 (34.9 %)	5683 (13.6 %)
	<i>tm14</i> > <i>tm13</i>	17506 (41.9 %)	4037 (9.6 %)
Jogo 8 (<i>N</i> = 43223)	<i>tm15</i> > <i>tm16</i>	17900 (41.4 %)	8713 (20.1 %)
	<i>tm16</i> > <i>tm15</i>	11439 (26.5 %)	5171 (12.0 %)

Tabela 2.4. Tabela de contingência para o número de *frames* em que cada equipe apresentou maiores valores de espalhamento que seu adversário, quando se encontrava com e sem posse de bola.

Jogos	Espalhamento	Número de frames (Porcentagem de N)	
		Com posse de bola	Sem posse de bola
Jogo 1 (N = 41441)	<i>tm1 > tm2</i>	17757 (42.8 %)	6496 (15.7 %)
	<i>tm2 > tm1</i>	11063 (26.7 %)	6125 (14.8 %)
Jogo 2 (N = 43568)	<i>tm3 > tm4</i>	19144 (43.9 %)	9274 (21.3 %)
	<i>tm4 > tm3</i>	10818 (24.8 %)	4362 (10.0 %)
Jogo 3 (N = 41922)	<i>tm5 > tm6</i>	19504 (46.5 %)	8484 (20.2 %)
	<i>tm6 > tm5</i>	10144 (24.2 %)	3790 (9.0 %)
Jogo 4 (N = 41678)	<i>tm7 > tm8</i>	14290 (34.3 %)	7573 (18.2 %)
	<i>tm8 > tm7</i>	14040 (33.7 %)	5775 (13.9 %)
Jogo 5 (N = 43296)	<i>tm9 > tm10</i>	16433 (37.9 %)	7851 (18.1 %)
	<i>tm10 > tm9</i>	13156 (30.4 %)	5856 (13.5 %)
Jogo 6 (N = 42726)	<i>tm11 > tm12</i>	15466 (36.2 %)	7982 (18.7 %)
	<i>tm12 > tm11</i>	15659 (36.6 %)	3619 (8.5 %)
Jogo 7 (N = 41803)	<i>tm13 > tm14</i>	14509 (34.7 %)	5633 (13.5 %)
	<i>tm14 > tm13</i>	17556 (42.0 %)	4105 (9.8 %)
Jogo 8 (N = 43223)	<i>tm15 > tm16</i>	17222 (39.8 %)	8609 (19.9 %)
	<i>tm16 > tm15</i>	11543 (26.7 %)	5849 (13.5 %)

O teste Qui-quadrado revelou que as frequências com que as equipes apresentam maiores valores de área e espalhamento foram significativamente maiores ($p < 0,001$) quando as mesmas possuíam a posse de bola, comparadas às situações que se encontravam sem posse de bola. Em média, para cada jogo, em 71,1% e 70,1% do tempo total as equipes apresentaram maiores áreas e espalhamento que o oponente e possuíam a posse de bola, respectivamente.

Por fim, foram calculadas as áreas e espalhamentos das equipes, enquanto defendiam, nas situações em que as mesmas realizaram desarmes ou sofreram finalizações a gol. A tabela 2.5 mostra que, nas situações de defesa, as equipes apresentaram maiores valores de área e espalhamento ($p < 0,01$) quando sofreram finalizações do que quando realizaram desarmes. Da mesma forma, estas variáveis foram calculadas enquanto atacavam, nas situações em que as mesmas realizaram finalizações ou sofreram desarmes. Os resultados da tabela 2.6 mostram que as equipes apresentaram maiores valores quando sofreram desarmes do que quando realizaram finalizações a gol ($p < 0,01$).

Tabela 2.5. Área de ocupação e espalhamento (mediana \pm intervalo de confiança) em situações de desarmes (n=1897) e finalizações (n=233), nas condições em que as equipes defendiam.

Variáveis	Situação de defesa	
	Quando realizaram desarmes	Quando sofreram finalizações
Área de ocupação (m ²)	920,7 \pm 13,3 *	1110,4 \pm 41,7
Espalhamento (m)	174,1 \pm 1,3 *	200,1 \pm 3,7

* $p < 0,01$.

Tabela 2.6. Área de ocupação e espalhamento (mediana \pm intervalo de confiança) em situações de desarmes (n=1897) e finalizações (n=233), nas condições em que as equipes atacavam.

Variáveis	Situação de ataque	
	Quando sofreram desarmes	Quando realizaram finalizações
Área de ocupação (m ²)	1059,6 \pm 15,2 *	898,9 \pm 43,9
Espalhamento (m)	185,1 \pm 1,4 *	172,7 \pm 4,7

* $p < 0,01$.

2.4 - Discussão

Em uma partida de futebol, os jogadores assumem suas posições em campo, em função do tempo, de acordo com a dinâmica do jogo. Neste estudo, duas variáveis descreveram a distribuição dos jogadores para caracterizar a tática de equipes brasileiras. A norma de Frobenius da matriz de distâncias entre jogadores e as áreas dos envoltórios convexos representaram, respectivamente, os espalhamentos e as áreas de ocupação das equipes e verificou-se que a posse de bola provocava mudanças na distribuição dos atletas em campo durante a partida. Os resultados confirmaram que enquanto defendem, jogadores do futebol brasileiro se movem para mais perto uns dos outros e reduzem sua área de ocupação. Inversamente, quando estão atacando, estas variáveis aumentam.

Okihara et al. (2004) apresentaram o mesmo comportamento para equipes do futebol japonês durante dois jogos oficiais. Neste caso, os autores determinaram apenas as áreas

das equipes a partir da posição de quatro jogadores que estão posicionados mais próximos das linhas limítrofes do campo. Por outro lado, na presente pesquisa, utilizou-se a área do envoltório convexo, que predominantemente leva em consideração um maior número de jogadores. Os autores deste estudo da literatura mostraram que sem posse de bola, a área de ocupação (média \pm desvio padrão) das equipes japonesas variou de $1207,1 \pm 631,8$ a $1392,4 \pm 460,9$ m². Com posse de bola, as áreas variaram de $1379,6 \pm 570$ a $1703 \pm 569,2$ m². As diferenças entre as formas de cálculo da área de ocupação podem explicar porque os valores apresentados por Okihara et al. foram constantemente maiores que as apresentadas neste estudo. De fato, o polígono formado pelo envoltório convexo sempre estará contido no polígono formado pelo método proposto por Okihara e colaboradores, justificando-se desta forma o motivo pelo qual os resultados do presente estudo apresentaram áreas de ocupação menores.

Após uma análise visual das séries temporais de espalhamento de equipes adversárias, verificou-se uma relação “em fase”: quando o espalhamento de uma equipe aumenta, a de seu oponente também tende a aumentar. Estes dados não corroboram os apresentados por Yue et al (Yue et al., 2008a), que mostraram uma relação de “contra-fase” para as séries temporais do raio instantâneo de duas equipes. O mesmo comportamento foi demonstrado nas séries temporais de área de ocupação. No entanto, testes de correlação entre as séries temporais de equipes adversárias podem comprovar esse comportamento em estudos futuros.

Os resultados também mostraram que há uma correlação positiva entre a área de ocupação e espalhamento. Porém, eventualmente uma equipe pode apresentar altos valores de área sem associação com altos valores de espalhamento. Da mesma forma, a distribuição dos jogadores pode apresentar baixo valor de área, mas não baixo valor de espalhamento. Estas circunstâncias podem ser explicadas pelo fato de que um jogador afastado de seus companheiros provoca um aumento da área de ocupação, mas, uma vez que todos os outros jogadores estão agrupados, a medida de espalhamento é reduzida. Outra exceção ocorre se todos os jogadores se posicionarem na barreira em uma cobrança de falta do adversário: nesta situação, a área de ocupação tende a zero, mas a medida de espalhamento não. Estes exemplos podem explicar porque os coeficientes de correlação não apresentaram valores mais próximos de 1. Portanto, a área de ocupação e o espalhamento fornecem informações particulares sobre a distribuição dos jogadores em campo e, em conjunto com outras variáveis, explicam melhor a dinâmica do jogo.

Se equipes brasileiras possuem uma estratégia ofensiva de espalhar os jogadores e uma estratégia defensiva de agrupamento, espera-se que toda vez que uma equipe possui a posse de bola ela apresente maiores valores de área e espalhamento que seus adversários. No entanto, as tabelas de contingência mostraram que, em média para cada jogo, equipes apresentam maiores valores de área e espalhamento que seus adversários, sem posse de bola, em 28,9 e 29,9% do tempo, respectivamente. Estes resultados são compreensíveis por dois motivos. O primeiro motivo é que existe um período de transição para que a equipe que perde a posse de bola apresente menores valores de área e espalhamento, ou seja, há uma demora na estratégia de agrupamento. Da mesma forma, também há uma demanda de tempo para que a equipe que ganha a posse de bola apresente maiores valores que seu adversário. O segundo motivo é que neste estudo a posse de bola foi sempre atribuída a uma das equipes, mesmo quando a bola estava fora de jogo. No entanto, adotou-se este critério porque, mesmo quando a bola está fora de jogo, os jogadores se organizam para atacar e defender, agrupando-se ou espalhando-se, em função de ter a posse de bola ou não na próxima ação.

Durante o processo de treinamento, é comum os técnicos instruírem seus jogadores para se organizarem em campo conforme uma estratégia estabelecida. Por exemplo, as equipes podem compactar seus jogadores apenas quando a equipe adversária ultrapassa a linha do meio campo, em direção ao ataque. Além disto, as equipes ao atacar podem se organizar de acordo com algum padrão de jogo determinado pelo técnico. Castelo (1999) sugere que, em equipes que priorizam a posse de bola ao atacar, a organização dos jogadores em campo apresenta uma estrutura compacta. No entanto, este comportamento não foi encontrado para as equipes brasileiras estudadas. Desta forma, análises futuras, com equipes de diferentes países, podem ajudar pesquisadores a melhor compreender e identificar diferentes padrões de jogo.

O futebol é um esporte complexo e mesmo uma grande quantidade de variáveis medidas podem não explicar ou determinar o resultado de jogos. Por esta razão, a literatura afirma que jogos de futebol são processos estocásticos (Yue et al., 2008a; b). Uma análise descritiva da tabela 2.1, por exemplo, aponta que não há uma clara relação entre o placar de jogo e os valores de área de ocupação e espalhamento. Porém, independente deste fator, os movimentos e a distribuição dos jogadores em campo possuem características determinísticas que explicam parte da dinâmica do jogo, conforme verificado nos resultados apresentados.

Enquanto defende, alguns dos objetivos da equipe são evitar sofrer uma finalização e recuperar a posse de bola. Inversamente, enquanto atacam, os jogadores se organizam para aumentarem as oportunidades de finalizações e evitarem serem desarmados (Mitchell, 1996). Desta forma, na análise das situações de finalizações e desarmes buscou-se avaliar se equipes brasileiras possuem uma organização defensiva que pode auxiliá-las a realizarem desarmes e preveni-las de sofrer chutes a gol. Além disto, buscou-se avaliar se equipes brasileiras possuem uma distribuição em campo enquanto atacam que as ajude a obter sucesso realizando finalizações e as previna de sofrer desarmes.

Os resultados mostraram que em situações de defesa, as equipes apresentaram menores valores de área e espalhamento quando realizaram desarmes do que quando sofreram finalizações. Estes dados podem indicar que equipes são mais suscetíveis a sofrerem finalizações quando não estão compactadas suficientemente. Enquanto atacavam, as equipes apresentaram menores valores de área e espalhamento quando realizaram finalizações, comparadas às situações em que foram desarmadas. Portanto, estes resultados podem ajudar técnicos a aumentar as chances de suas equipes recuperarem a posse de bola enquanto defendem e de finalizar enquanto atacam.

O método e os resultados apresentados neste estudo são importantes ferramentas para que técnicos aprimorem o treinamento e o desempenho das equipes durante competições. As análises apresentadas contribuem para a compreensão da dinâmica do futebol e fornecem importantes informações sobre as características táticas de equipes de futebol. Métodos de rastreamento automático utilizados durante sessões de treinamento permitem que técnicos avaliem as variáveis apresentadas no presente estudo e, baseados nestas informações, consigam controlar melhor a distribuição de seus atletas em campo e sistematizem ações táticas. Estas variáveis também podem ser analisadas após os jogos e correções na organização dos jogadores podem ser realizadas, se necessárias.

2.5 - Conclusões

Os objetivos deste estudo foram analisar a organização de equipes brasileiras em campo enquanto atacam e defendem, através de medidas da área de ocupação e espalhamento e analisar estas variáveis em situações específicas de finalizações e desarmes. Os resultados confirmaram que os jogadores estão mais distantes uns dos outros e cobrindo uma área maior do

campo quando as equipes possuem a posse de bola. Quando estão sem posse de bola, as equipes estão mais compactas e controlam uma área menor do campo. Além disto, quando as equipes apresentam valores de área e espalhamento maiores que seus adversários, as mesmas normalmente estão atacando.

Em circunstâncias específicas de defesa, as equipes brasileiras apresentaram menores valores de área e espalhamento quando realizaram desarmes, comparadas às situações que sofreram finalizações. Enquanto atacavam, as equipes apresentaram menores valores de área e de espalhamento quando realizaram finalizações, comparadas às situações em que sofreram desarmes. Com estes resultados, foi possível mostrar as interações de ataque e defesa de equipes brasileiras e como os jogadores se organizam em campo.

Capítulo 3: Análise das séries temporais da área de ocupação e do espalhamento de jogadores de futebol em campo.

3.1 - Introdução

Uma quantidade considerável de pesquisas tem voltado suas atenções para a aplicação de ferramentas capazes de analisar o futebol e assim fornecer subsídios para o desenvolvimento do treinamento e avaliação de equipes durante jogos oficiais. Grande parte dessas pesquisas tem utilizado métodos baseados em sistemas de notação para a identificação de padrões e sistemas de jogo a partir de uma análise das ações técnicas realizadas pelos jogadores (Reep e Benjamin, 1968; Bate, 1988; Yamanaka, Hughes e Lott, 1993; Garganta, Maia e Basto, 1997; Hughes e Franks, 2005; Barros et al., 2006).

Algumas pesquisas também foram apresentadas na literatura com o propósito de analisar variáveis do desempenho físico dos atletas durante os jogos, como distância percorrida e velocidade com que os atletas se deslocam (Barros et al., 2007; Di Salvo et al., 2007; Bradley et al., 2009; Di Salvo et al., 2009). Estes estudos foram realizados com a utilização de sistemas de rastreamento de jogadores, que possibilitam a identificação da posição do atleta em função do tempo, durante toda a partida. No entanto, uma vez identificada a posição de todos os jogadores de uma mesma equipe em cada instante, além de análises no âmbito físico e técnico, estudos relacionados à distribuição dos atletas em campo podem ser realizados.

Para Mitchell (1996), quando uma equipe ataca, os jogadores devem se preocupar em manter a posse de bola, avançar em relação ao gol e criar condições para receber a bola. Já ao defender, os jogadores se movimentam com o propósito de proteger o próprio gol e recuperar a posse de bola. Portanto, a forma como os jogadores se organizam em campo podem refletir as ações estratégicas definidas entre os mesmos ou até mesmo orientações estabelecidas pelo treinador durante o jogo ou sessões de treinamento. Assim, a área de ocupação da equipe e a forma como seus jogadores estão distribuídos em campo são duas importantes variáveis que descrevem, em parte, a organização de jogadores em campo e representam alguns dos indicadores de desempenho tático (Garganta, Maia e Basto, 1997; Hughes e Bartlett, 2002; Frencken e Lemmink, 2009; Cunha et al., 2011).

A partir dessas duas variáveis, estudos têm buscado encontrar padrões de comportamento das equipes durante as partidas (Okihara et al., 2004; Yue et al., 2008a; Frencken

et al., 2011) para uma compreensão da dinâmica do esporte e das interações entre ataque e defesa. Os estudos que buscaram analisar a área de ocupação (Okiyama et al., 2004) e espalhamento (Yue et al., 2008a) de equipes de futebol em jogos oficiais demonstraram que estas duas variáveis diminuem quando as equipes perdem a posse de bola e, quando estão com posse de bola, estes valores aumentam.

No entanto, outros fatores sobre a organização dos jogadores em campo também devem ser considerados quando há a intenção de se identificar características particulares das equipes e do esporte, como, por exemplo, a evolução destas variáveis em função do tempo de jogo. Ao se quantificar a área de ocupação das equipes e o espalhamento dos jogadores em campo em função do tempo, séries temporais são obtidas. Estas séries temporais fornecem desta forma dados sobre a evolução da organização das equipes durante o jogo e sobre as interações entre equipes adversárias. Dentre as características das séries temporais que podem ser analisadas e que, particularmente para o futebol, podem fornecer tais informações, estão a similaridade entre as séries temporais de equipes adversárias, a magnitude e a frequência da série temporal.

Segundo Yue et al. (2008a), a investigação visual das séries temporais de espalhamento de equipes adversárias mostra que há uma provável relação de “contra fase” entre elas. No entanto, para uma confirmação desta relação entre as séries temporais, análises de correlação podem ser realizadas. Estas análises por sua vez podem contribuir com estudos que buscam descrever os esportes como fenômenos que possuem propriedades de sistemas dinâmicos (Mcgarra et al., 2002; Frencken et al., 2011). Já as análises da magnitude das séries temporais de área de ocupação e espalhamento podem fornecer como as equipes se compactam e dispersam em campo durante a partida e se as mesmas mudam seus comportamentos ao longo do jogo. Por outro lado, ao transformar as séries temporais para o domínio da frequência, associações com a velocidade com que as equipes aumentam e diminuem os valores de área e espalhamento, durante jogadas de ataque e defesa, podem ser realizadas.

Portanto, uma exploração das séries temporais da área de ocupação e espalhamento de equipes de futebol podem fornecer subsídios para uma compreensão sobre a dinâmica do esporte e, ainda, sobre as características das equipes envolvidas no jogo. Desta forma, o objetivo deste estudo foi realizar análises das séries temporais de área de ocupação e espalhamento de equipes de futebol para uma descrição da organização dos jogadores em função

do tempo de jogo. Particularmente, priorizaram-se as análises de similaridade entre séries temporais de equipes adversárias, a magnitude e a frequência destas séries temporais. As hipóteses que fundamentaram esse estudo foram: a) há uma relação de sincronismo e contra fase entre as séries temporais de equipes adversárias, para as variáveis de área de ocupação e espalhamento; b) é possível identificar características sobre a organização de equipes de futebol enquanto atacam e defendem.

3.2- Métodos

Coleta de dados

O Comitê de Ética em Pesquisa da Universidade Estadual Paulista aprovou esta pesquisa. Foram analisados 10 jogos da primeira divisão de campeonatos nacionais de futebol, realizados entre os anos de 2001 e 2008. Para facilitar a identificação, os 20 times analisados foram nomeados *tm1*, *tm2*, ..., *tm20*. Todos os jogos foram filmados por até seis câmeras digitais (30 Hz) fixadas em pontos altos dos estádios e mantidas fixas do começo ao fim do jogo. Cada câmera enquadrava aproximadamente um quarto do campo, com regiões de sobreposição entre elas. Após os jogos, as sequências de imagens foram transferidas para computadores a uma frequência de 7,5 Hz em seis jogos e a 30 Hz em quatro jogos. Em seguida, iniciaram-se os procedimentos para a viabilização do rastreamento automático dos jogadores.

Participantes e método para rastreamento automático

As trajetórias de 277 jogadores foram obtidas em todos os jogos, através de um sistema de rastreamento automático via o *software* DVideo (Figuerola, Leite e Barros, 2006a; b). O *software* DVideo possui uma taxa de rastreamento automático de 94% dos *frames* processados, um erro médio de 0,3 m na determinação da posição do jogador e de 1,4% da distância percorrida pelos jogadores (Figuerola, Leite e Barros, 2006b; Misuta, 2009).

Os jogadores de cada time, em cada jogo, foram enumerados $p = 1, 2, \dots, 14$ (contabilizando goleiro, titulares e reservas). Assim, as coordenadas bidimensionais de cada jogador foram definidas como $Xp(t)$ e $Yp(t)$, onde t representa cada instante de tempo (em segundos). Um filtro digital passa-baixa Butterworth de 3ª ordem, com uma frequência de corte de 0,4 Hz suavizou as coordenadas bidimensionais dos atletas. De posse destes dados suavizados, foram registradas ações técnicas realizadas pelos jogadores para a identificação dos instantes nos

quais a equipe se encontrava com e sem posse de bola, e também calculadas as variáveis de área de ocupação e espalhamento das equipes ao longo de toda a partida.

Área de ocupação da equipe

A área de ocupação da equipe, neste estudo, foi representada por meio da área do envoltório convexo formado a partir da posição dos atletas. O envoltório convexo de um conjunto de pontos S no plano (neste caso, representado pela posição de cada jogador de uma mesma equipe, exceto o goleiro, em cada instante de tempo t) é o menor polígono convexo que contém S . Se S é finito, o envoltório convexo será sempre um polígono cujos vértices são um subconjunto de S (Preparata e Shamos, 1985). O envoltório convexo foi calculado através da técnica *Quickhull* (Barber, Dobkin e Huhdanpaa, 1996), disponível no software Matlab®.

A cada instante de tempo t , o envoltório convexo das posições dos jogadores de cada equipe foi dividido em triângulos para o cálculo de suas áreas que, somadas, forneceram a área de ocupação da equipe em função do tempo.

Espalhamento da equipe

Para a obtenção do valor de espalhamento da equipe em função do tempo, foram calculadas as distâncias euclidianas entre cada jogador e seus companheiros de equipe. As distâncias entre os jogadores foram então organizadas em uma matriz simétrica $D(t)$ de ordem 10. Por conveniência, foram utilizados apenas os valores da matriz triangular inferior L .

A norma de Frobenius é uma das normas matriciais mais utilizada em álgebra linear e fornece uma medida de distância (Golub e Van Loan, 1989). Assim, calculou-se a norma de Frobenius para a matriz L (rotulada $\|L\|_F$) para cada instante de tempo (t) para representar o espalhamento da equipe.

$$\|L(t)\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n |l_{ij}|^2} \quad (3.1)$$

De acordo com a equação 3.1, maiores valores da norma de Frobenius da matriz L caracterizam jogadores espalhados pelo campo. Por outro lado, baixos valores representam que os jogadores estão mais próximos uns dos outros. Tanto a área de ocupação da equipe quanto o espalhamento foram calculados a uma frequência de 7.5 Hz.

Posse de bola

Uma equipe encontrava-se em uma situação de ataque a partir do momento em que a mesma recuperava completamente a posse de bola do adversário. Dessa forma, desarmes incompletos nos quais o domínio de bola retornava rapidamente ao adversário não foram considerados como posse de bola conquistada. Quando a bola se encontrava fora de jogo, a posse de bola era atribuída sempre à equipe que iria realizar a próxima ação técnica. Esse procedimento foi adotado por considerar-se que os jogadores se organizam em campo, mesmo com o jogo parado, em função de estarem com ou sem a posse de bola na próxima ação técnica do jogo. Além disso, verificou-se em todos os jogos que as situações de bola parada não causaram influências, com valores extremos, nas variáveis de área de ocupação e espalhamento das equipes.

A cada instante de tempo, atribuiu-se a condição de posse de bola de cada equipe em função do tempo (t), conforme exemplificado abaixo para $tm1$ e $tm2$:

$$\begin{cases} posse_{tm1}(t) = 1 \text{ e } posse_{tm2}(t) = 0 \text{ se a posse de bola estava} \\ \text{com o } tm1 \text{ no momento } (t) \\ posse_{tm1}(t) = 0 \text{ e } posse_{tm2}(t) = 1 \text{ se a posse de bola estava} \\ \text{com o } tm2 \text{ no momento } (t) \end{cases} \quad (3.2)$$

Análise das séries temporais

A análise das séries temporais foi realizada de duas formas distintas: mantendo-se as variáveis no domínio do tempo e transformando-as no domínio da frequência, conforme descrito a seguir.

Análise no domínio do tempo

No domínio do tempo, foram realizadas análises de similaridades entre os valores das séries temporais de equipes adversárias, tanto para a área de ocupação quanto para o espalhamento. Para isto, foi calculada a correlação cruzada entre os sinais. Neste estudo, a correlação cruzada foi aplicada com a defasagem temporal variando entre -15 e 15 segundos. Em seguida, identificou-se o valor máximo de correlação entre as duas séries temporais, bem como a defasagem temporal associada a este valor.

Para investigar como uma série temporal evolui ao longo do tempo, o RMS (*root mean square*) é uma medida constantemente utilizada e fornece uma medida da magnitude do sinal (Grimshaw et al., 2006). O RMS para uma função contínua $f(t)$ sobre a janela de tempo T é definido por:

$$RMS(f) = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt} \quad (3.3)$$

Com o intuito de analisar como a organização dos jogadores em campo se altera ao longo do tempo, nas situações em que a equipe ataca e defende, o cálculo do RMS das séries temporais de área de ocupação e espalhamento foi realizado em janelas delimitadas pelos instantes de troca da posse de bola. Desta forma, calculou-se o RMS para cada janela de tempo, separadamente, em que a equipe se encontrava com e sem posse de bola. Ao final do jogo, foram obtidos valores discretos de RMS em função do tempo médio de cada janela de tempo, para cada uma das equipes, nas condições em que as mesmas se encontravam com e sem posse de bola. A figura 3.1 exemplifica a sequência de cálculos para a variável de área de ocupação de uma determinada equipe.

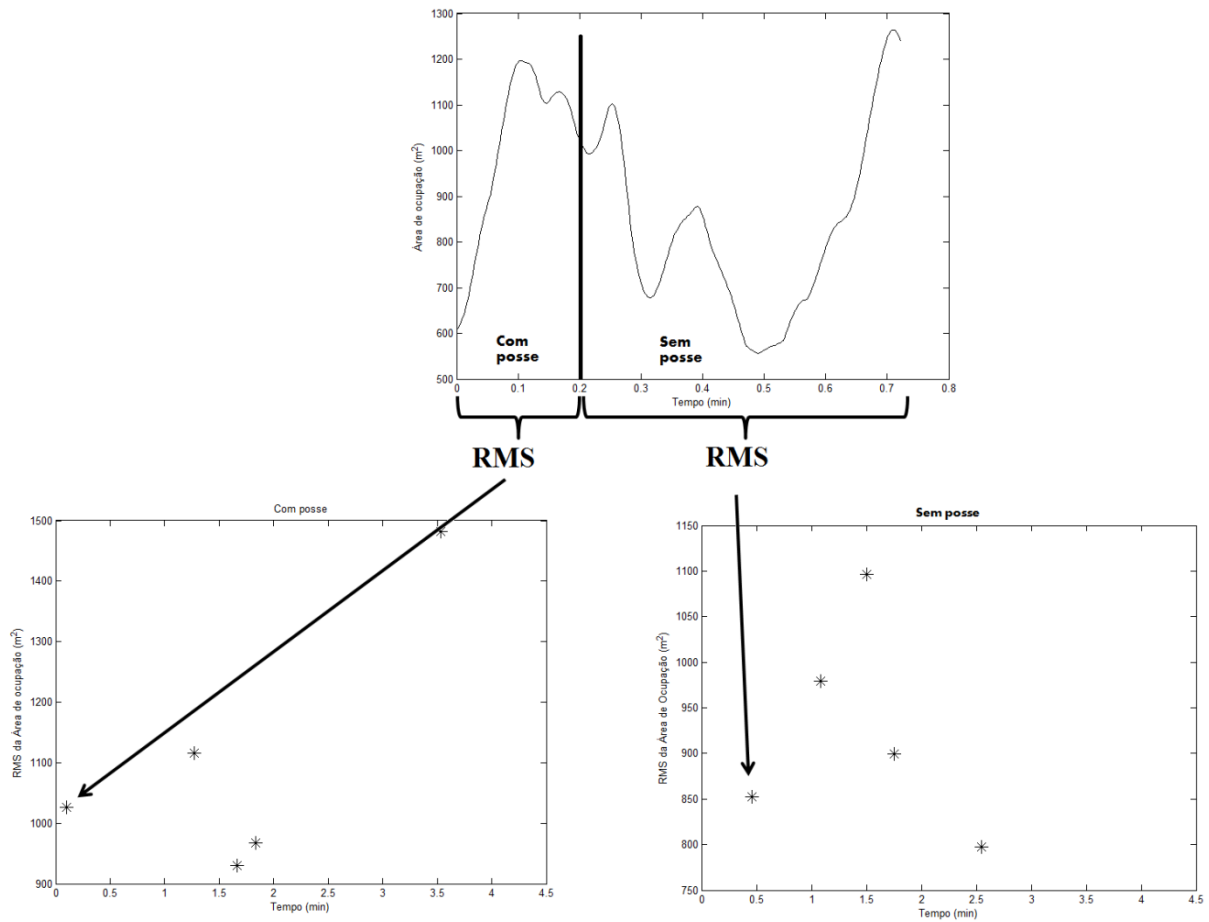


Figura 3.1. Procedimento usado no cálculo de RMS de cada janela da série temporal, nas condições em que a equipe se encontrava com e sem posse de bola.

Após o cálculo de RMS dos valores de área de ocupação e espalhamento da equipe ao longo do tempo, em função da posse de bola, obteve-se um conjunto de pontos discretos, utilizados para averiguar se a equipe apresentou um aumento ou uma diminuição dessas variáveis ao longo do jogo. Para isso, realizou-se uma regressão linear destes pontos obtidos, nas condições em que a equipe se encontrava com e sem posse de bola. Assim, foram analisados os coeficientes angulares e lineares de cada regressão, bem como o valor de probabilidade estatística (p) encontrado.

Análise no domínio da frequência

Para qualquer série temporal, é possível averiguar como as intensidades de flutuação do sinal estão distribuídas no domínio da frequência, através da análise espectral (Yue

et al., 2008b). Deste modo, para as séries temporais da área de ocupação de cada equipe, de espalhamento e de posse de bola, calculou-se a distribuição da potência em função da frequência pelo método FFT (“*Fast Fourier Transformation*”), em ambiente Matlab®. Testes específicos de autocorrelação das séries temporais e do espectro de potência em função da frequência demonstraram não haver a presença de ruído branco que pudesse prejudicar a análise espectral.

Em seguida, identificou-se a frequência predominante (FP) e a frequência mediana (FM), definidas, respectivamente, como a frequência associada ao máximo valor de potência e a frequência que divide a integral do espectro de potência em duas partes iguais (Figura 3.2). Para facilitar a compreensão dos resultados, a unidade de medida adotada foi ciclos/min.

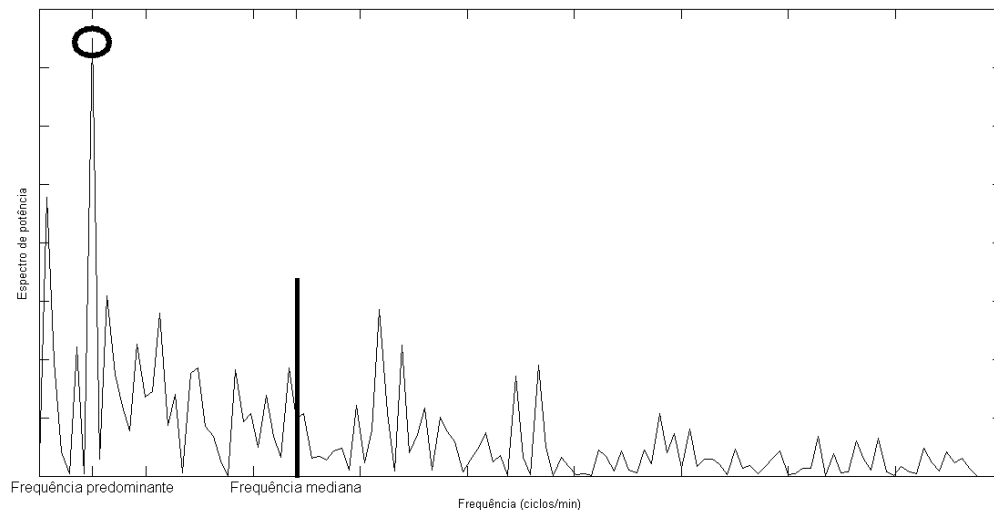


Figura 3.2. Representação da frequência predominante e frequência mediana do espectro de potência de uma série temporal. A frequência mediana divide a integral do espectro de potência em duas partes iguais.

Análises estatísticas

Todas as análises estatísticas foram realizadas através do *software* Matlab®. A correlação cruzada entre as séries temporais de equipes adversárias foi analisada de forma descritiva, identificando-se o valor máximo de correlação encontrado (que poderia variar entre -1 e 1) e o valor de defasagem temporal associado a esse valor.

Os valores de RMS nas condições em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola foram apresentados como média \pm desvio-padrão. Na análise das regressões

lineares dos conjuntos de pontos discretos, referentes aos valores de RMS de cada janela de tempo que a equipe se encontrava com e sem posse de bola, os valores de coeficiente angular e linear, bem como os valores de probabilidade estatística (p) encontrados foram analisados de forma descritiva. As análises foram realizadas separadamente para o primeiro e segundo tempo de cada partida.

Com relação aos dados de frequência predominante e mediana das séries temporais de área de ocupação e espalhamento, procurou-se verificar se houve mudança destes valores do primeiro para o segundo tempo. Para isto, o teste de normalidade *Lilliefors* foi aplicado e, quando encontrada normalidade, aplicou-se o teste t pareado. Por outro lado, quando a normalidade dos dados não foi identificada, o teste não paramétrico pareado de Wilcoxon foi realizado. Para as séries temporais que associam a posse de bola às equipes, realizou-se uma análise descritiva. Em todas as análises estatísticas, adotou-se um nível de significância de $p < 0,05$.

3.3 - Resultados

A figura 3.3 apresenta alguns exemplos de trechos das séries temporais de área de ocupação e espalhamento das equipes de dois jogos distintos. A análise visual das séries temporais entre as equipes adversárias mostra que, embora com magnitudes distintas, há similaridade entre os sinais. Esses resultados podem ser confirmados na figura 3.4, onde são apresentados os resultados da análise da correlação cruzada entre as séries temporais em função da defasagem temporal. É possível verificar que os valores máximos de correlação são positivos e estão associados a baixos valores de defasagem temporal. Já a tabela 3.1 resume os resultados desta análise, onde são apresentados os valores máximos encontrados de correlação cruzada (CC) e os valores das defasagens temporais (DT) associados.

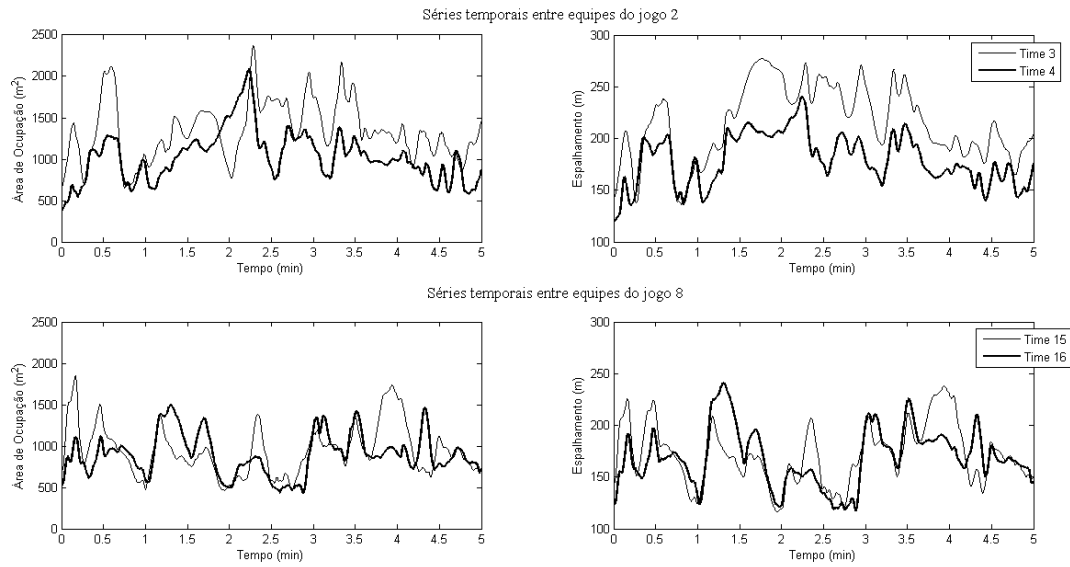


Figura 3.3. Séries temporais de área de ocupação e espalhamento entre diferentes equipes analisadas.

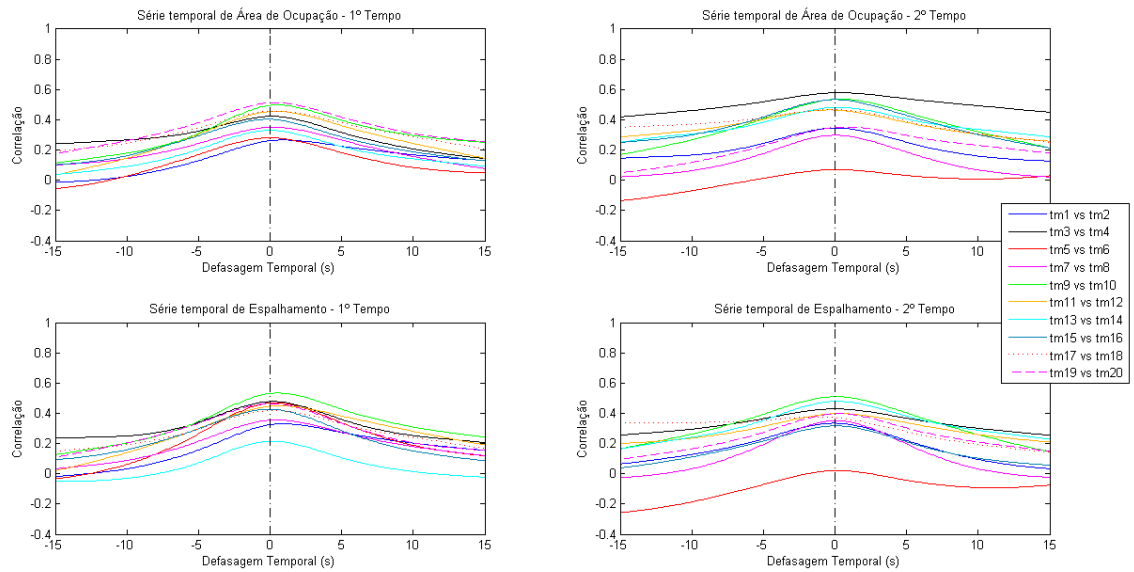


Figura 3.4. Análise da similaridade entre as séries temporais de equipes adversárias, para as variáveis estudadas, realizada por correlação cruzada.

Tabela 3.1. Resultados da análise de correlação cruzada entre as séries temporais de equipes adversárias.

Jogo	Times	Área de ocupação				Espalhamento			
		1º Tempo		2º tempo		1º Tempo		2º tempo	
		CC	DT (s)	CC	DT (s)	CC	DT (s)	CC	DT (s)
Jogo 1	<i>tm1x tm2</i>	0,27	0,93	0,35	0,00	0,33	0,93	0,33	0,00
Jogo 2	<i>tm3 x tm4</i>	0,42	0,13	0,58	0,40	0,48	0,13	0,43	0,00
Jogo 3	<i>tm5 x tm6</i>	0,28	0,00	0,07	0,00	0,47	0,27	0,02	0,13
Jogo 4	<i>tm7 x tm8</i>	0,35	0,13	0,30	0,00	0,36	0,40	0,35	0,00
Jogo 5	<i>tm9 x tm10</i>	0,50	0,53	0,54	0,40	0,53	0,53	0,51	0,13
Jogo 6	<i>tm11x tm12</i>	0,46	0,40	0,47	0,40	0,45	0,67	0,40	0,27
Jogo 7	<i>tm13 x tm14</i>	0,33	0,00	0,48	0,27	0,22	0,13	0,48	0,13
Jogo 8	<i>tm15 x tm16</i>	0,40	0,13	0,53	0,00	0,43	0,00	0,32	0,00
Jogo 9	<i>tm17 x tm18</i>	0,46	0,27	0,47	0,27	0,42	0,27	0,38	1,20
Jogo 10	<i>tm19 x tm20</i>	0,51	0,40	0,35	0,80	0,46	0,00	0,40	0,27
Média ± desvio padrão		0,40 ± 0,08	0,29 ± 0,29	0,41 ± 0,15	0,25 ± 0,26	0,41 ± 0,09	0,33 ± 0,30	0,36 ± 0,13	0,21 ± 0,36

* CC = valor máximo de correlação; DT = valor de defasagem temporal associado a CC.

As tabelas a seguir apresentam os resultados da magnitude das variáveis e suas tendências de alteração em função do tempo de jogo, estratificados pelas condições em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola. A magnitude foi expressa pelos valores de RMS (média ± desvio-padrão) das séries temporais e as tendências de alteração foram apresentadas pelos coeficientes angulares, coeficientes lineares e os valores de probabilidade estatística (*p*) do teste de regressão, para as variáveis de área de ocupação (tabela 3.2) e espalhamento (tabela 3.3) das equipes. Em destaque estão as equipes que apresentaram $p < 0,05$.

Tabela 3.2. Resultados da magnitude da área de ocupação e sua tendência de alteração em função do tempo de jogo, estratificados pelas condições em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola.

		Área de ocupação (m ²)															
		1º tempo								2º tempo							
Jogo	Times	Com posse				Sem posse				Com posse				Sem posse			
		RMS	Coef. Linear	Coef. Angular	p	RMS	Coef. Linear	Coef. Angular	p	RMS	Coef. Linear	Coef. Angular	p	RMS	Coef. Linear	Coef. Angular	p
Jogo 1	tm1	1182,5 ± 205,5	1148,3	1,7	0,502	1047,8 ± 228,1	933,4	5,5	0,040	1158,4 ± 281,6	1296,6	-5,9	0,047	1092,7 ± 249,7	1119,3	-1,2	0,658
	tm2	1096,5 ± 252,6	1083,5	0,6	0,838	1044,8 ± 196,8	1037,4	0,4	0,878	1187,0 ± 245,3	1043,5	6,3	0,014	1126,2 ± 263,2	985,5	6,0	0,029
Jogo 2	tm3	1205,9 ± 220,3	1230,0	-1,2	0,619	1121,8 ± 197,4	1221,8	-4,7	0,019	1189,1 ± 326,1	1277,1	-3,5	0,386	1112,2 ± 266,2	1098,9	0,9	0,796
	tm4	984,8 ± 245,3	1069,8	-4,0	0,114	937,6 ± 204,6	968,5	-1,5	0,491	1123,1 ± 238,7	1015,2	4,8	0,093	1075,8 ± 277,6	1014,4	2,4	0,478
Jogo 3	tm5	1310,4 ± 217,0	1256,7	2,6	0,337	1223,0 ± 241,4	1259,1	-1,8	0,555	1488,5 ± 281,5	1307,6	7,7	0,028	1407,2 ± 312,9	1252,5	6,4	0,108
	tm6	1210,9 ± 250,0	1302,8	-4,5	0,135	1154,7 ± 190,8	1204,8	-2,4	0,309	1270,6 ± 252,5	1219,2	2,1	0,515	1106,9 ± 230,7	1005,2	4,3	0,140
Jogo 4	tm7	1143,2 ± 232,8	1153,6	-0,5	0,873	1103,7 ± 245,4	1030,6	3,4	0,296	1212,1 ± 258,9	1278,3	-2,9	0,374	1132,8 ± 252,9	1218,2	-3,8	0,225
	tm8	1198,1 ± 249,6	1176,8	1,0	0,765	1115,7 ± 231,1	944,3	8,2	0,005	1182,7 ± 210,8	1219,1	-1,6	0,538	1155,8 ± 212,5	1147,5	0,4	0,892
Jogo 5	tm9	1054,5 ± 232,9	1193,3	-6,4	0,004	961,1 ± 168,3	1014,5	-2,4	0,143	947,7 ± 215,5	981,5	-1,6	0,489	916,9 ± 200,0	915,2	0,1	0,969
	tm10	960,8 ± 182,1	875,4	3,9	0,028	907,1 ± 164,8	832,6	3,4	0,032	960,0 ± 225,9	1029,1	-3,4	0,168	921,7 ± 199,6	1047,3	-6,0	0,004
Jogo 6	tm11	1095,6 ± 209,3	1125,0	-1,4	0,594	1026,5 ± 201,0	941,2	3,9	0,105	938,6 ± 252,6	1133,9	-8,6	0,002	890,2 ± 214,0	1034,1	-6,5	0,007
	tm12	980,8 ± 231,2	910,9	3,2	0,253	921,6 ± 261,6	958,0	-1,7	0,597	1012,8 ± 215,3	1044,5	-1,4	0,573	947,1 ± 191,0	891,8	2,4	0,275
Jogo 7	tm13	1069,5 ± 187,3	1178,0	-4,3	0,044	970,9 ± 183,2	976,6	-0,2	0,919	1026,7 ± 189,0	907,5	4,6	0,024	886,4 ± 195,8	795,3	3,6	0,092
	tm14	985,1 ± 219,2	1123,3	-5,4	0,033	928,9 ± 146,4	996,7	-2,7	0,111	985,9 ± 184,8	954,8	1,2	0,549	905,2 ± 171,7	854,2	2,0	0,301
Jogo 8	tm15	966,0 ± 241,1	984,6	-0,8	0,739	938,6 ± 183,9	961,5	-1,0	0,597	986,2 ± 176,6	1052,1	-2,6	0,108	950,4 ± 213,9	1026,8	-3,0	0,117
	tm16	938,3 ± 229,1	1034,5	-4,1	0,071	873,7 ± 176,4	882,4	-0,4	0,831	914,9 ± 220,0	1012,3	-3,9	0,050	869,1 ± 216,2	909,7	-1,6	0,424
Jogo 9	tm17	1085,0 ± 256,6	1057,9	1,1	0,767	996,4 ± 302,4	850,1	6,1	0,152	1160,8 ± 170,6	1251,4	-3,9	0,128	1042,3 ± 152,6	1047,2	-0,2	0,933
	tm18	1017,1 ± 225,4	923,4	3,9	0,220	991,7 ± 209,2	874,7	4,8	0,109	1068,0 ± 223,9	1076,9	-0,4	0,916	1002,9 ± 170,5	995,1	0,3	0,899
Jogo 10	tm19	1143,1 ± 199,8	1149,5	-0,3	0,924	1115,6 ± 144,4	967,6	6,6	0,001	1144,0 ± 159,7	1210,2	-2,7	0,219	1168,6 ± 115,8	1152,7	0,7	0,676
	tm20	1043,8 ± 194,5	956,7	3,9	0,188	994,5 ± 195,3	934,8	2,8	0,357	1094,5 ± 246,8	1110,6	-0,7	0,843	1017,8 ± 215,6	1044,1	-1,1	0,722

* RMS (média ± desvio-padrão) = *Root mean square* do sinal; Coef. Linear = coeficiente linear da regressão linear; Coef. Angular = coeficiente angular da regressão linear; *p* = probabilidade de significância estatística da análise de regressão linear.

Tabela 3.3. Resultados da magnitude do espalhamento e sua tendência de alteração em função do tempo de jogo, estratificados pelas condições em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola.

		Espalhamento (m)															
		1º tempo								2º tempo							
Jogo	Times	Com posse				Sem posse				Com posse				Sem posse			
		RMS	Coef. Linear	Coef. Angular	p	RMS	Coef. Linear	Coef. Angular	p	RMS	Coef. Linear	Coef. Angular	p	RMS	Coef. Linear	Coef. Angular	p
Jogo 1	tm1	193,7 ± 17,4	187,6	0,3	0,157	182,2 ± 20,9	169,0	0,6	0,009	195,3 ± 26,7	204,2	-0,4	0,181	188,1 ± 25,6	189,7	-0,1	0,798
	tm2	185,1 ± 19,5	179,7	0,3	0,262	183,4 ± 17,0	182,0	0,1	0,728	194,4 ± 21,4	183,3	0,5	0,031	191,9 ± 24,5	179,6	0,5	0,042
Jogo 2	tm3	194,2 ± 19,5	194,3	0,0	0,980	190,4 ± 22,0	197,6	-0,3	0,139	194,3 ± 28,3	199,9	-0,2	0,528	191,4 ± 30,1	193,7	-0,1	0,802
	tm4	177,1 ± 21,5	181,4	-0,2	0,364	172,1 ± 18,4	170,3	0,1	0,649	189,3 ± 20,4	182,3	0,3	0,248	186,3 ± 26,9	185,3	0,0	0,909
Jogo 3	tm5	203,0 ± 17,7	197,8	0,3	0,258	199,6 ± 23,2	203,6	-0,2	0,486	221,1 ± 28,1	195,7	1,1	0,001	218,9 ± 30,3	195,3	1,0	0,009
	tm6	199,1 ± 16,6	207,5	-0,4	0,040	195,7 ± 14,6	198,9	-0,2	0,390	203,3 ± 23,1	198,6	0,2	0,510	189,5 ± 22,4	179,0	0,4	0,115
Jogo 4	tm7	191,6 ± 17,1	193,8	-0,1	0,643	189,2 ± 20,9	181,8	0,3	0,208	198,4 ± 20,0	201,7	-0,1	0,566	189,1 ± 24,0	198,1	-0,4	0,174
	tm8	193,0 ± 22,4	191,0	0,1	0,765	189,2 ± 22,1	175,9	0,6	0,026	193,6 ± 18,2	196,2	-0,1	0,612	193,5 ± 20,0	194,5	0,0	0,863
Jogo 5	tm9	185,3 ± 20,9	194,0	-0,4	0,051	177,1 ± 16,6	178,4	-0,1	0,706	175,9 ± 22,1	178,7	-0,1	0,580	171,4 ± 23,2	171,0	0,0	0,941
	tm10	174,8 ± 18,0	165,6	0,4	0,016	171,7 ± 17,0	162,8	0,4	0,013	175,7 ± 23,4	182,6	-0,3	0,181	175,1 ± 22,0	189,0	-0,7	0,004
Jogo 6	tm11	188,7 ± 20,0	188,6	0,0	0,980	185,2 ± 28,1	170,5	0,7	0,045	171,8 ± 29,9	202,0	-1,3	0,000	168,1 ± 25,8	193,0	-1,1	0,000
	tm12	178,0 ± 21,7	166,5	0,5	0,040	171,8 ± 23,6	172,2	0,0	0,951	176,0 ± 21,0	187,0	-0,5	0,040	172,6 ± 19,2	180,0	-0,3	0,145
Jogo 7	tm13	182,1 ± 14,1	191,0	-0,4	0,028	175,0 ± 17,7	175,9	0,0	0,867	182,4 ± 15,9	174,7	0,3	0,085	167,5 ± 18,7	159,8	0,3	0,136
	tm14	177,6 ± 21,7	188,4	-0,4	0,093	173,2 ± 16,3	175,6	-0,1	0,616	175,4 ± 15,5	174,6	0,0	0,841	173,2 ± 19,5	173,2	0,0	0,990
Jogo 8	tm15	176,0 ± 23,0	176,1	0,0	0,988	175,3 ± 19,7	175,1	0,0	0,964	179,7 ± 18,7	182,8	-0,1	0,478	175,6 ± 21,7	178,0	-0,1	0,637
	tm16	172,9 ± 24,5	179,1	-0,3	0,286	169,4 ± 20,9	169,3	0,0	0,998	172,3 ± 22,3	180,3	-0,3	0,116	170,3 ± 22,8	173,2	-0,1	0,579
Jogo 9	tm17	186,4 ± 25,9	181,4	0,2	0,585	181,1 ± 33,9	167,7	0,6	0,245	185,2 ± 16,5	198,3	-0,6	0,017	178,4 ± 14,2	187,5	-0,4	0,077
	tm18	181,4 ± 20,2	172,3	0,4	0,182	179,9 ± 21,5	168,5	0,5	0,131	182,3 ± 21,1	196,2	-0,6	0,069	174,8 ± 18,0	181,7	-0,3	0,279
Jogo 10	tm19	191,3 ± 15,3	189,7	0,1	0,759	187,3 ± 13,3	171,0	0,7	0,000	193,8 ± 15,0	198,6	-0,2	0,344	194,0 ± 11,5	191,2	0,1	0,456
	tm20	180,7 ± 17,8	170,1	0,5	0,076	176,0 ± 19,0	169,6	0,3	0,303	184,8 ± 22,8	186,7	-0,1	0,799	179,8 ± 21,8	186,7	-0,3	0,351

* RMS (média ± desvio-padrão) = *Root mean square* do sinal; Coef. Linear = coeficiente linear da regressão linear; Coef. Angular = coeficiente angular da regressão linear; p = probabilidade de significância estatística da análise de regressão linear.

Como pode ser observado nas tabelas 3.2 e 3.3, exceto para o jogo 8, houve pelo menos uma probabilidade significativa na análise de regressão linear para as variáveis estudadas, no primeiro ou no segundo tempo de jogo. As figuras 3.5 e 3.6 apresentam exemplos em que a regressão linear calculada se apresentou significativa, para a área de ocupação e para o espalhamento da equipe.

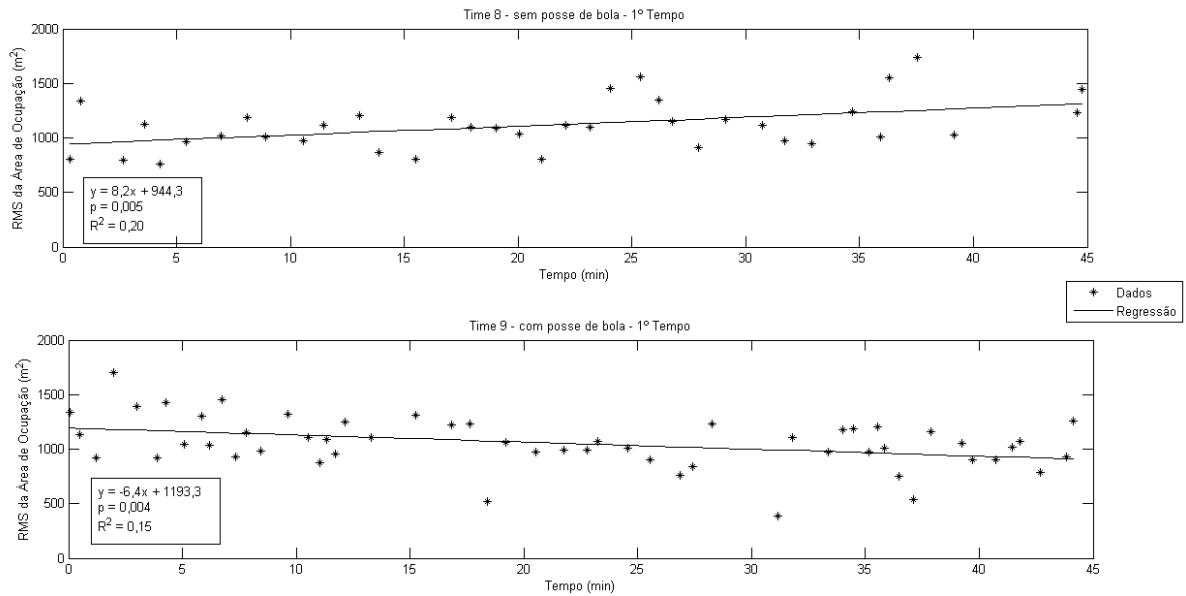


Figura 3.5. Exemplificação da análise de tendência de alteração dos valores de magnitude da área de ocupação em função do tempo de jogo, para *tm8* e *tm9* nas condições em que a equipe se encontrou sem e com posse de bola, respectivamente, durante o 1º tempo de jogo.

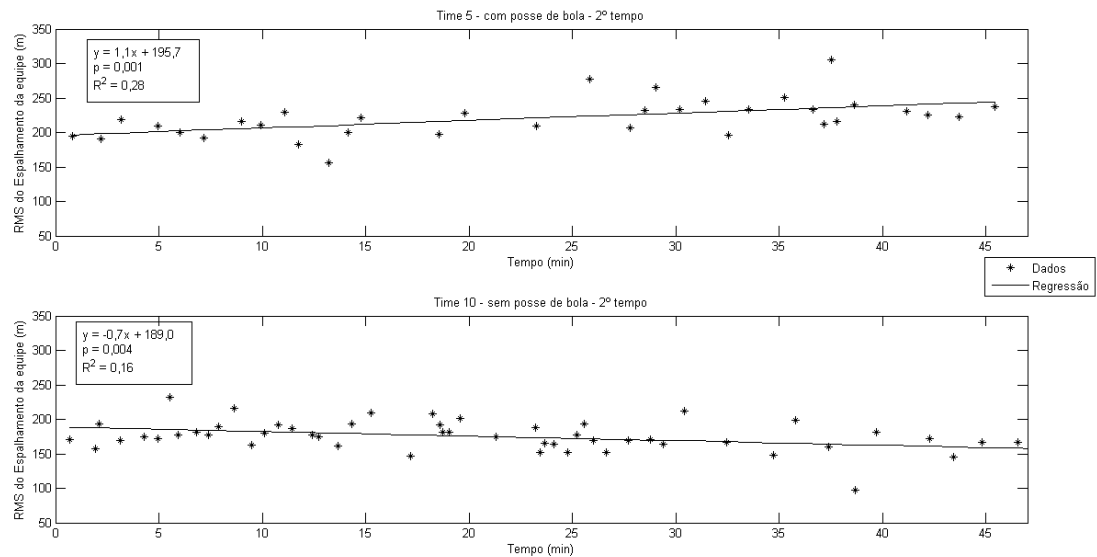


Figura 3.6 Exemplificação da análise de tendência de alteração dos valores de magnitude do Espalhamento em função do tempo de jogo, para *tm5* e *tm10* nas condições em que a equipe se encontrou sem e com posse de bola, respectivamente, durante o 2º tempo de jogo.

As figuras 3.7 e 3.8 exemplificam os resultados da análise espectral para o jogo entre *tm3* e *tm4*, das séries temporais de área de ocupação e espalhamento, respectivamente. Para

todos os jogos estudados, foram identificadas as frequências predominantes e calculadas as frequências medianas dos sinais, durante o primeiro e o segundo tempo.

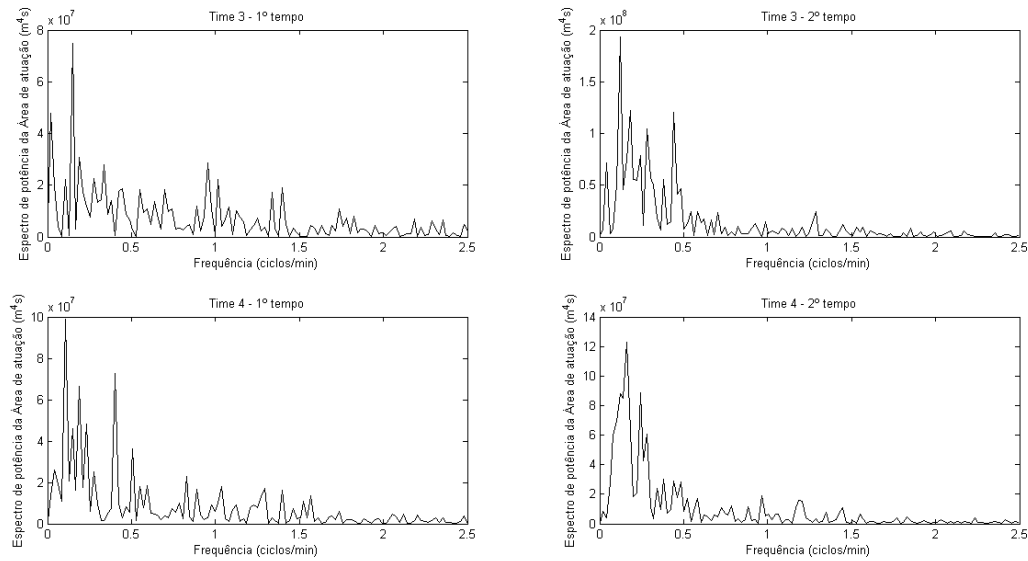


Figura 3.7. Espectro de potência da área de ocupação de *tm3* e *tm4* em função da frequência durante os períodos de jogo (1º e 2º tempo).

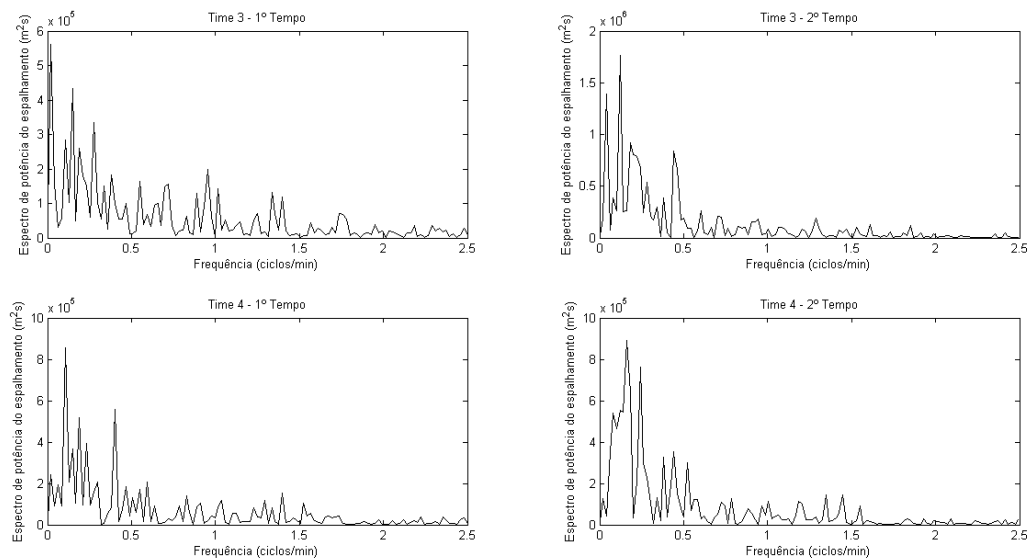


Figura 3.8. Espectro de potência do espalhamento de *tm3* e *tm4* em função da frequência durante os períodos de jogo (1º e 2º tempo).

Na tabela 3.4 estão apresentadas as frequências predominantes (FP) e medianas (FM) de cada equipe, nos dois períodos de jogo, para a variável de área de ocupação. O teste

pareado de Wilcoxon mostrou que não há diferenças entre as frequências predominantes do primeiro com o segundo tempo ($p = 0,51$). Em compensação, o teste t pareado mostrou que as frequências medianas do primeiro tempo são significativamente maiores que as apresentadas no segundo tempo ($p < 0,01$).

A tabela 3.5, por sua vez, apresenta os resultados da análise espectral para as séries temporais da variável de espalhamento das equipes. Os resultados do teste pareado de Wilcoxon também não revelaram diferenças significativas entre as frequências predominantes do primeiro e do segundo tempo ($p=0,71$). Porém, para as frequências medianas, os valores foram significativamente maiores para o primeiro tempo ($p < 0,01$).

Tabela 3.4. Resultados das análises espectrais realizadas nas séries temporais de área de ocupação de todas as equipes, durante o primeiro e segundo tempo de jogo.

Jogo	Times	Área de Ocupação			
		1º Tempo		2º Tempo	
		FP (ciclos/min)	FM (ciclos/min)	FP (ciclos/min)	FM (ciclos/min)
Jogo 1	tm1	0,17	0,70	0,21	0,55
	tm2	0,09	0,63	0,02	0,36
Jogo 2	tm3	0,15	0,72	0,12	0,32
	tm4	0,11	0,51	0,16	0,28
Jogo 3	tm5	0,35	0,74	0,02	0,47
	tm6	0,13	0,65	0,28	0,45
Jogo 4	tm7	0,04	0,63	0,68	0,71
	tm8	0,37	0,63	0,04	0,66
Jogo 5	tm9	0,02	0,54	0,36	0,50
	tm10	0,04	0,67	0,18	0,44
Jogo 6	tm11	0,49	0,68	0,02	0,29
	tm12	0,04	0,49	0,02	0,35
Jogo 7	tm13	0,02	0,56	0,19	0,47
	tm14	0,15	0,76	0,28	0,62
Jogo 8	tm15	0,36	0,64	0,02	0,61
	tm16	0,17	0,47	0,06	0,25
Jogo 9	tm17	0,04	0,43	0,04	0,38
	tm18	0,09	0,65	0,18	0,48
Jogo 10	tm19	0,31	0,81	0,62	0,75
	tm20	0,04	0,61	0,23	0,46
Média ± desvio padrão		0,16 ± 0,14	0,63 ± 0,10*	0,19 ± 0,19	0,47 ± 0,14

FM = frequência mediana; FP = frequência predominante.

* Significativamente diferente que o grupo correspondente (FM) do 2º tempo.

Tabela 3.5. Resultados das análises espectrais realizadas nas séries temporais de espalhamento de todas as equipes, durante o primeiro e segundo tempo de jogo.

Jogo	Times	Espalhamento			
		1º Tempo		2º Tempo	
		FP (ciclos/min)	FM (ciclos/min)	FP (ciclos/min)	FM (ciclos/min)
Jogo 1	tm1	0,17	0,70	0,21	0,55
	tm2	0,09	0,63	0,02	0,38
Jogo 2	tm3	0,02	0,64	0,12	0,30
	tm4	0,11	0,45	0,16	0,28
Jogo 3	tm5	0,35	0,74	0,02	0,36
	tm6	0,20	0,74	0,28	0,49
Jogo 4	tm7	0,04	0,70	0,68	0,83
	tm8	0,11	0,61	0,04	0,66
Jogo 5	tm9	0,02	0,39	0,26	0,44
	tm10	0,04	0,69	0,18	0,48
Jogo 6	tm11	0,02	0,32	0,02	0,25
	tm12	0,34	0,62	0,02	0,27
Jogo 7	tm13	0,02	0,70	0,02	0,49
	tm14	0,15	0,39	0,28	0,60
Jogo 8	tm15	0,36	0,64	0,10	0,59
	tm16	0,17	0,49	0,06	0,22
Jogo 9	tm17	0,04	0,39	0,02	0,34
	tm18	0,19	0,71	0,02	0,44
Jogo 10	tm19	0,09	0,83	0,27	0,71
	tm20	0,02	0,66	0,23	0,42
Média ± desvio padrão		0,13 ± 0,11	0,60 ± 0,14*	0,15 ± 0,16	0,46 ± 0,16

FM = frequência mediana; FP = frequência predominante.

* Significativamente diferente que o grupo correspondente (FM) do 2º tempo.

Ainda com relação às análises espectrais, a tabela 3.6 apresenta as frequências predominantes e medianas encontradas para as séries temporais associadas à posse de bola, para cada jogo. A análise exploratória permitiu verificar que a frequência com que as equipes trocam de posse de bola se difere muito do primeiro para o segundo tempo, como observado pelas frequências medianas da série temporal de posse de bola nos jogos 2, 3, 4, 9 e 10, cujas mudanças são maiores que 30%.

Tabela 3.6. Resultados das análises espectrais realizadas nas séries temporais de posse de bola, para todos os jogos, durante o primeiro e segundo tempo de jogo.

Jogo	Times	Posse de bola			
		1º tempo		2º tempo	
		FP (ciclos/min)	FM (ciclos/min)	FP (ciclos/min)	FM (ciclos/min)
Jogo 1	<i>tm1</i>	0,09	0,68	0,17	0,65
	<i>tm2</i>				
Jogo 2	<i>tm3</i>	0,28	0,72	0,14	0,34
	<i>tm4</i>				
Jogo 3	<i>tm5</i>	0,13	0,35	0,25	0,57
	<i>tm6</i>				
Jogo 4	<i>tm7</i>	0,17	0,63	0,06	0,43
	<i>tm8</i>				
Jogo 5	<i>tm9</i>	0,54	0,90	0,28	0,76
	<i>tm10</i>				
Jogo 6	<i>tm11</i>	0,04	0,64	0,08	0,67
	<i>tm12</i>				
Jogo 7	<i>tm13</i>	0,11	0,76	0,47	0,75
	<i>tm14</i>				
Jogo 8	<i>tm15</i>	0,36	0,93	0,06	0,78
	<i>tm16</i>				
Jogo 9	<i>tm17</i>	0,26	0,39	0,26	0,26
	<i>tm18</i>				
Jogo 10	<i>tm19</i>	0,02	0,48	0,06	0,31
	<i>tm20</i>				
Média ± desvio padrão		0,20 ± 0,16	0,65 ± 0,20	0,19 ± 0,13	0,55 ± 0,20

3.4 - Discussão

Nos últimos anos, avanços tecnológicos têm permitido a utilização de sofisticados sistemas de análise do movimento em esportes durante competições oficiais. Esses sistemas têm sido amplamente aplicados com o propósito de se quantificar as exigências físicas de jogadores de futebol durante uma partida (Carling et al., 2008). No entanto, se as coordenadas bidimensionais dos jogadores em campo são conhecidas, é possível compreender importantes características da dinâmica do jogo e como os jogadores se organizam (Kim, 2006). A área de ocupação e o espalhamento dos jogadores de uma equipe são algumas das importantes variáveis que podem descrever a organização dos atletas em campo.

Para a área de ocupação das equipes, utilizou-se nesta pesquisa a área do envoltório convexo associado à posição de todos os jogadores (exceto o goleiro) de uma mesma equipe, em função do tempo. Um estudo anterior utilizou a posição dos quatro jogadores posicionados mais próximos das linhas limítrofes do campo (Okihara et al., 2004). Este tipo de metodologia pode sofrer uma influência muito grande da posição de um dos jogadores na medida de área no sentido de superestimar seus valores. O envoltório convexo, neste caso, leva em consideração a posição de um número maior de jogadores de uma mesma equipe, sendo, desta forma, menos influenciado por um jogador. Além disso, ao depender da posição de mais jogadores e não apenas quatro, o envoltório convexo pode representar melhor a organização da equipe, com relação à área de ocupação.

Como medida de espalhamento dos jogadores em campo, aplicou-se a norma de Frobenius na matriz de distâncias entre jogadores de uma mesma equipe. A norma de Frobenius é constantemente utilizada em álgebra linear, possui propriedades conhecidas e fornece uma ideia de distância (Golub e Van Loan, 1989) que, no caso deste estudo, foi associada a uma medida de espalhamento dos atletas em campo durante a partida.

A partir dessas variáveis calculadas ao longo de todo o jogo e, identificados os momentos em que a equipe se encontrava com e sem posse de bola, obteve-se as séries temporais que representam a organização dos atletas de uma mesma equipe enquanto atacam e defendem. A partir destes dados, análises mantendo-se as variáveis no domínio do tempo ou transformando-as no domínio da frequência puderam ser realizadas. Com isso, informações sobre a dinâmica do jogo e as características das equipes foram apresentadas.

Equipes de futebol cobrem uma área maior do campo e distribuem seus jogadores quando estão com posse de bola e, por outro lado, quando se encontram sem posse de bola, adotam uma organização mais compacta (Okihara et al., 2004; Yue et al., 2008a). Por esta razão, a hipótese inicial da análise de similaridade entre as séries temporais de equipes adversárias era de que haveria uma relação de contra fase entre elas, ou seja, quando os valores da variável de uma equipe aumentam, os da sua adversária diminuem e vice-versa. No entanto, esta hipótese inicial não foi confirmada, uma vez que as análises de correlação cruzada apresentaram valores positivos, confirmando assim, uma tendência de sincronia em fase entre as variáveis de equipes adversárias. Estes dados não corroboram a literatura, que apresentou uma relação de contra fase entre equipes adversárias, a partir de uma análise visual das séries

temporais de espalhamento (Yue et al., 2008a). Para as séries temporais de área de ocupação de equipes disputando jogos reduzidos (com cinco jogadores por equipe), um estudo recente (Frencken et al., 2011) mostrou coeficientes de correlação de Pearson que variaram entre -0,01 e 0,07. Estes valores também se diferem dos encontrados no presente estudo, justificados possivelmente pelo fato desses autores terem analisado jogos reduzidos e não partidas oficiais de futebol profissional.

De fato, quando analisamos visualmente as séries temporais entre equipes adversárias, verifica-se, na maior parte do tempo, uma relação em fase. Em outras palavras, quando a área ou espalhamento de uma equipe aumenta, a sua adversária apresenta um comportamento similar. No entanto, também é possível verificar que há momentos que esta relação é inversa. Desta forma, caso exista um equilíbrio entre momentos em que os sinais se encontram em fase e em contra fase, os valores de correlação podem se aproximar de zero. Ainda, caso não existisse nenhuma sincronia entre os sinais, a correlação também apresentaria valores ao redor de zero. No entanto, a análise visual de todas as séries temporais de todos os jogos mostra que os baixos valores de correlação estão associados às intermitências entre situações em que os sinais se encontram em fase e em contra fase, e não por momentos de ausência de sincronia. Portanto, ainda que os valores de correlação cruzada tenham se apresentado relativamente baixos, provavelmente há uma predominância de similaridade em fase entre os sinais das equipes.

Cabe ressaltar que a correlação cruzada foi realizada para todo o período de jogo e não em janelas específicas de intervalos de tempo como são realizadas nas observações visuais das relações de fase e contra fase das séries temporais. Portanto, futuras investigações podem realizar, por exemplo, análises de similaridade em períodos de tempo delimitados pelos momentos de troca de posse de bola.

A análise de correlação cruzada também permitiu verificar que há uma defasagem temporal da ordem de décimos de segundo entre os sinais, o que demonstra uma interação entre as equipes adversárias. Alguns estudos da literatura têm procurado identificar nos esportes algumas características de sistemas dinâmicos que apresentem padrões globais de comportamento (Mcgarry et al., 2002; Frencken et al., 2011). Ao verificar que as séries temporais possuem sincronia, com baixa defasagem temporal, estes resultados podem indicar a presença deste padrão. Portanto, análises mais detalhadas dessas defasagens temporais, associadas aos

eventos ocorridos no jogo, podem auxiliar pesquisadores a compreender estes comportamentos e, por consequência, a dinâmica da organização dos jogadores em campo.

Ainda mantendo-se os dados no domínio do tempo, o cálculo do RMS de cada janela de tempo das variáveis de área de ocupação e espalhamento das equipes, nas condições em que as mesmas se encontravam com e sem posse de bola, permitiu analisar a evolução da organização das equipes ao longo da partida. Para isso, com os valores de RMS, realizou-se uma regressão linear e foram apresentados os coeficientes lineares e angulares. Caso o coeficiente angular tenha se apresentado com um valor positivo (associado a um valor de significância $p < 0,05$), pode-se afirmar que, ao longo da partida, a equipe teve uma tendência de aumentar a sua variável analisada, naquela determinada condição (com ou sem posse de bola). Em outras palavras, caso uma determinada equipe, com posse de bola, tenha apresentado um coeficiente angular positivo para a variável de espalhamento, por exemplo, isto representa que a mesma adotou uma estratégia de distribuir mais seus jogadores em campo com o avançar do tempo, naquele período de jogo. Em contrapartida, coeficientes angulares negativos (associados a uma significância de $p < 0,05$) demonstram que as equipes tendem a diminuir seus valores da variável analisada ao longo daquele determinado período da partida.

O valor absoluto do coeficiente angular indica o grau de mudança de comportamento da equipe ao longo da partida. Os resultados mostraram que em quase todos os jogos analisados, pelo menos uma das equipes apresentou uma mudança significativa de comportamento, seja no primeiro ou no segundo tempo, na área de ocupação e/ou no espalhamento. Estes resultados demonstram que a presente análise fornece informações para a identificação das características de cada time ao longo do jogo. Futuras pesquisas podem analisar se estas alterações de comportamento estão associadas à ocorrência de eventos específicos do jogo como gols, substituições ou mudanças táticas efetuadas pelo técnico.

Além das análises no domínio do tempo, no presente estudo também foram realizadas análises das variáveis no domínio da frequência. Esta análise dá a ideia da frequência com que a equipe aumenta e diminui os valores de área de ocupação e de espalhamento. Desse modo, maiores valores de frequência representam que as equipes alteram os valores de área e espalhamento mais rapidamente.

No presente estudo, foram apresentadas as frequências predominantes e medianas das séries temporais das variáveis analisadas para todas as equipes, bem como da série

temporal associada à posse de bola, para cada jogo. Ao observar as figuras das análises espectrais, percebe-se que constantemente há outras frequências, além da predominante, que também estão associadas a altos valores de espectro de potência. Desse modo, a análise particular da frequência predominante se torna complexa e dificulta sua interpretação, uma vez que, pelos resultados apresentados, parece não haver um mesmo padrão de comportamento entre as equipes. Em algumas situações, a frequências predominantes diminuem drasticamente do primeiro para o segundo tempo (como, por exemplo, para a variável área de ocupação da equipe *tm5*), porém, em outras situações, a mesma pouco se altera ou aumenta para o segundo tempo.

Além disso, em muitos casos, a frequência predominante se apresentou extremamente baixa, fato que não corresponde ao fenômeno que foi avaliado. Esses resultados podem ser reflexos dos grandes períodos de tempo em que o jogo se encontra parado. Por outro lado, a frequência mediana parece mais adequada para esse tipo de análise, já que ela é mais sensível para demonstrar se o sinal está mais distribuído para maiores ou menores frequências (Grimshaw et al., 2006).

Além dos resultados apresentados para as frequências medianas mostrarem as características de cada equipe, no que diz respeito à velocidade com que a mesma se distribui e em seguida se compacta em campo, verificou-se que as equipes reduzem estas frequências das séries temporais do primeiro para o segundo tempo. Esses dados podem representar uma mudança tática da equipe, de acordo com seus objetivos na partida, ou podem também estar associados a uma redução do desempenho físico dos atletas. Estudos da literatura demonstram que há uma redução nas corridas de alta intensidade de jogadores de futebol do primeiro para o segundo tempo (Barros et al., 2007; Bradley et al., 2009; Di Salvo et al., 2009; Rampinini et al., 2009). Face à influência que os jogadores mais próximos das linhas limítrofes do campo (como zagueiros, laterais e atacantes) possuem na medida de área de ocupação, uma redução na frequência mediana dessa variável pode estar relacionada a uma redução da velocidade de deslocamento desses jogadores. Por outro lado, reduções da frequência mediana da medida de espalhamento podem refletir uma diminuição da velocidade de deslocamento de todos os jogadores de uma forma geral. No entanto, há necessidade de análises específicas, correlacionando-se os valores de frequência com os dados de velocidade dos atletas, para a realização deste tipo de inferência em estudos futuros.

Um estudo recente realizou uma análise espectral da velocidade de deslocamento das coordenadas x e y dos centros geométricos (definido como a média das coordenadas x e y de todos os jogadores de um mesmo time) de duas equipes durante um período de jogo do campeonato alemão (Yue et al., 2008b). No entanto, os autores apresentaram apenas figuras dos resultados encontrados e nenhum valor de frequência predominante ou mediana foi demonstrado, o que inviabiliza uma possível comparação com as análises aqui apresentadas.

Nos resultados também foram apresentadas as frequências predominantes e medianas das séries temporais de posse de bola. Estas frequências representam a velocidade com que a posse de bola troca de uma equipe para outra, refletindo assim a dinâmica das jogadas de ataque e defesa das equipes envolvidas na partida. Maiores frequências indicam que as equipes trocam de posse de bola em menos tempo e menores frequências significam que há uma maior manutenção da posse de bola por ambas as equipes ou por apenas uma delas. Os resultados mostraram que os valores das frequências medianas da série temporal associada à posse de bola estão na mesma ordem de grandeza que as frequências medianas das variáveis de área de ocupação e espalhamento. Assim, parece haver uma correspondência entre estas informações que juntas apresentam as características da dinâmica do jogo e das interações entre ataque e defesa. Verificou-se em muitos jogos que a frequência mediana se altera drasticamente do primeiro para o segundo tempo, representando assim uma mudança na dinâmica do jogo. Novos estudos poderão ainda realizar análises espectrais das variáveis medidas nesta pesquisa em menores intervalos de tempo (como a cada 15 minutos de jogo) para a obtenção de maiores detalhes das mudanças desta dinâmica de jogo ao longo da partida.

As técnicas de análise das séries temporais descritas no presente estudo podem, em futuras pesquisas, analisar como essas variáveis se alteram quando há uma mudança de placar no jogo. Ou seja, espera-se que, ao sofrer ou realizar um gol, a equipe passe a ter novos objetivos na partida e, para atingi-los, se organize de forma diferente no campo. Além disso, os resultados apresentados refletem a dinâmica de jogos da primeira divisão do campeonato brasileiro de futebol. De fato, análises das características dessas variáveis, em times de diferentes nacionalidades, podem agregar informações a estudos da literatura que, até o momento, buscaram identificar diferentes padrões de jogo com base apenas em dados coletados sobre as ações técnicas realizadas pelos jogadores (Bate, 1988; Yamanaka, Hughes e Lott, 1993; Hughes e

Churchill, 2005; Hughes e Franks, 2005), como tempo de ataque, número de passes envolvidos em cada posse de bola, número de chutes a gol, entre outros.

Cabe por fim ressaltar que as análises apresentadas nesta pesquisa podem ser aplicadas não somente durante jogos, mas também em treinamentos, para um maior controle de técnicos e jogadores com relação à organização da equipe em campo, de acordo com os objetivos pré-estabelecidos para a competição a ser disputada.

3.5 - Conclusões

O objetivo desse estudo consistiu em realizar análises das séries temporais de área de ocupação e espalhamento de equipes de futebol para uma descrição da forma como os jogadores se organizam em campo durante o jogo. Particularmente, foram analisadas as características de similaridade entre as séries temporais de equipes adversárias, a magnitude e a frequência destas séries. Verificou-se que a análise dos dados, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência, fornecem informações sobre as características das equipes em cada jogo.

Os resultados permitiram concluir que as equipes estudadas diminuem as frequências medianas do 1º para o 2º tempo, podendo assim refletir uma mudança de comportamento ou uma possível associação com a redução de desempenho físico, conforme descrito na literatura. Ainda, a análise espectral da série temporal referente à posse de bola possibilitou uma descrição da dinâmica dos jogos ao fornecer dados sobre a frequência com que as equipes atacam e defendem.

A análise das séries temporais de equipes adversárias permitiu concluir que há uma relação de similaridade em fase entre as mesmas. Para isso, verificou-se que os valores máximos de correlação se apresentaram positivos, em função de uma baixa defasagem temporal. Por fim, os resultados do cálculo do RMS das séries temporais de área de ocupação e espalhamento, nas condições em que as equipes se encontravam com e sem posse de bola, mostraram que, constantemente, as equipes alteram de forma significativa sua organização em campo ao longo da partida. As análises e os resultados do presente estudo mostraram ser, portanto, importantes ferramentas de controle da organização dos jogadores em campo que podem ser utilizadas por técnicos de futebol durante jogos oficiais e sessões de treinamento.

4 Conclusões

O jogo de futebol é, por natureza, um fenômeno com características extremamente complexas, devido não somente às regras que o regem, mas principalmente à grande quantidade de jogadores envolvidos e as relações entre eles. Durante uma partida, os jogadores buscam constantemente realizar ações imprevisíveis aos adversários para que seus objetivos naquele instante sejam alcançados, sendo estes defensivos, como recuperar a posse de bola, ou ofensivos, como conseguir realizar uma finalização.

Ao longo dos últimos anos, buscou-se na ciência ferramentas para que se pudesse cada vez mais aprimorar as condições físicas, técnicas, táticas e psicológicas dos atletas, que influenciam diretamente nos seus desempenhos durante os jogos. Portanto, é fato que dificilmente uma ou outra variável seja capaz de explicar, sozinha, o resultado de um jogo de futebol, uma vez que há inúmeros fatores que o influenciam. No entanto, técnicos e pesquisadores têm buscado na ciência maiores informações acerca das exigências físicas dos atletas durante a competição e sobre suas ações técnicas e táticas realizadas.

A distribuição dos jogadores em campo é uma das características táticas da equipe que podem ser analisadas no jogo. No primeiro capítulo desta pesquisa foram apresentados não somente como foram coletados os dados, mas também duas variáveis para a análise da distribuição dos atletas em campo: a área de ocupação e o espalhamento das equipes. Desta forma, demonstrou-se como quantificar essas variáveis a partir das coordenadas bidimensionais dos jogadores em função do tempo. Tanto o cálculo da área de ocupação quanto do espalhamento tem como grande vantagem o fato de levarem em consideração a posição dos jogadores em campo em cada instante de tempo e, principalmente, por possuírem propriedades matemáticas conhecidas e bem estabelecidas.

A partir destas duas variáveis, dois estudos foram realizados sobre a quantificação da distribuição de jogadores brasileiros em campo. No primeiro estudo, os objetivos consistiram em caracterizar como as equipes se distribuem em campo quando se encontram com e sem posse de bola e em situações específicas de finalizações e desarmes. Com os principais resultados, pode-se concluir que as equipes brasileiras apresentam uma estrutura mais compacta e com menor ocupação de área quando estão sem posse de bola, comparados aos valores de espalhamento e área de ocupação nos instantes em que se encontram com posse de

bola. Além disso, as hipóteses de que as equipes possuem uma organização diferente em campo quando conseguem realizar desarmes, comparadas às situações em que sofrem finalizações, foram confirmadas. Os resultados mostraram equipes mais espalhadas e ocupando maiores áreas quando sofreram finalizações do que quando conseguiram realizar desarmes. Por outro lado, enquanto atacavam, as equipes apresentaram menor espalhamento e área quando conseguiram finalizar, comparadas às situações em que sofreram desarmes. Estas análises, realizadas para cada equipe, podem contribuir para que técnicos organizem seus jogadores em campo de forma que aumentem as chances de realizar desarmes enquanto defendem e de realizar finalizações enquanto atacam.

Ainda no primeiro estudo, foram apresentadas algumas séries temporais da área de ocupação e espalhamento de equipes durante o jogo, porém nenhuma análise específica foi realizada. A realização do segundo estudo foi motivada pelo fato de que características sobre a dinâmica do jogo e de como as equipes atacam e defendem pudessem ser identificadas ao se analisar estas séries temporais ainda no domínio do tempo ou no domínio da frequência. Assim, os objetivos consistiram em analisar as séries temporais de área de ocupação e de espalhamento de jogadores de futebol em campo a fim de descrever como as equipes se organizam ao longo do jogo.

A partir da obtenção dos valores de área e espalhamento em função do tempo, três análises foram realizadas: a análise do RMS em cada janela de tempo em que a equipe se encontrava com e sem posse de bola, a análise de similaridade entre as séries temporais de equipes adversárias e a análise espectral, onde as séries temporais foram transformadas para o domínio da frequência. Os resultados permitiram verificar, a partir da análise do RMS, que as equipes constantemente mudam sua organização em campo do começo para o final da partida, seja adotando uma estratégia de compactar seus jogadores ou de espalhar e ocupar uma área maior. A análise de correlação cruzada mostrou uma tendência das equipes adversárias apresentarem séries temporais similares em fase, características estas que futuramente podem ser relacionadas à teoria de sistemas dinâmicos.

Por sua vez, a análise espectral permitiu quantificar as frequências predominantes e medianas das séries temporais analisadas. Esta frequência representa a velocidade com que as equipes aumentam e diminuem seus valores de área de ocupação e espalhamento, sendo assim uma interpretação interessante da dinâmica do jogo. Os resultados

permitiram concluir que nas equipes analisadas há uma diminuição das frequências medianas das séries temporais de ambas as variáveis do primeiro para o segundo tempo.

Futuros estudos podem ainda buscar quantificar outros fatores relacionados à distribuição de jogadores de futebol em campo. Dentre eles, sugere-se que, para uma maior compreensão não apenas da forma como as equipes se distribuem em campo, mas também na interação entre equipes adversárias, sejam analisadas também as áreas de intersecção entre as equipes e as distâncias entre jogadores adversários. Estas análises podem contribuir com a literatura e com profissionais da área do futebol ao fornecer dados quantitativos sobre a proximidade entre jogadores adversários e, assim, estabelecer possíveis associações com tipos de marcação ou sistemas defensivos adotados.

5 Referências

- Abdel-Aziz, Y. I. e Karara, H. M. Direct linear transformation from comparator coordinates into object space coordinates in close-range photogrammetry. In: Proceedings of the Symposium on Close-Range Photogrammetry Illinois, 1971. 1-18.
- Barbanti, V. Dicionário de Educação Física e Esporte. Barueri: Manole. 2003
- Barber, C. B., Dobkin, D. P. e Huhdanpaa, H. The Quickhull algorithm for convex hulls. Acm Transactions on Mathematical Software, v.22, n.4, Dec, p.469-483. 1996.
- Barros, R. M. L., et al. Representation and analysis of soccer players' actions using principal components. Journal of Human Movement Studies, v.51, p.103-116. 2006.
- Barros, R. M. L., et al. Analysis of the distances covered by first division Brazilian soccer players obtained with an automatic tracking method. Journal of Sports Science and Medicine, v.6, p.233-242. 2007.
- Bate, R. Football chance: tactics and strategy. In: T. Reilly, A. Lees, K. Davis e W. J. Murphy (Ed.). Science and Football. London: E & FN SPON 1988, p.293-301
- Bradley, P. S., et al. High-intensity running in English FA Premier League soccer matches. J Sports Sci, v.27, n.2, Jan 15, p.159-68. 2009.
- Carling, C., et al. The role of motion analysis in elite soccer: contemporary performance measurement techniques and work rate data. Sports Medicine, v.38, n.10, p.839-62. 2008.
- Castelo, J. F. F. Fútbol: estructura y dinámica del juego. Barcelona: INDE Publicaciones. 1999
- Cunha, S. A. e Lima Filho, E. C. Metodologia para suavização de dados biomecânicos por função não paramétrica ponderada local robusta. Revista Brasileira de Biomecânica, v.1, n.6, p.23-28. 2003.
- Cunha, S. A., et al. Futebol: aspectos multidisciplinares para o ensino e treinamento. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 2011 (Educação Física no Ensino Superior)
- Di Salvo, V., et al. Performance characteristics according to playing position in elite soccer. International Journal of Sports Medicine, v.28, n.3, Mar, p.222-7. 2007.
- Di Salvo, V., et al. Analysis of high intensity activity in Premier League soccer. Int J Sports Med, v.30, n.3, Mar, p.205-12. 2009.
- Figueroa, P. J., Leite, N. J. e Barros, R. M. A flexible software for tracking of markers used in human motion analysis. Comput Methods Programs Biomed, v.72, n.2, Oct, p.155-65. 2003.

Figuerola, P. J., Leite, N. J. e Barros, R. M. L. Background recovering in outdoor image sequences: An example of soccer players segmentation. Image and Vision Computing, v.24, n.4, p.363-374. 2006a.

Figuerola, P. J., Leite, N. J. e Barros, R. M. L. Tracking soccer players aiming their kinematical motion analysis. Computer Vision and Image Understanding, v.101, n.2, p.122-135. 2006b.

Frencken, W., et al. Oscillations of centroid position and surface area of soccer teams in small-sided games. European Journal of Sport Science, v.11, n.4, p.215-223. 2011.

Frencken, W. G. P. e Lemmink, K. a. P. M. Team kinematics of small-sided soccer games. In: T. Reilly e F. Korkusuz (Ed.). Science and Football VI. New York: Routledge, 2009, p.161-166

Garganta, J. Modelação táctica do jogo de Futebol: Estudo da organização da fase ofensiva em equipas de alto rendimento. (Phd thesis). Faculdade de Ciências do Desporto e Educação Física, Universidade do Porto, Porto, 1997. 292 p.

Garganta, J., Maia, J. e Basto, F. Analysis of goal-scoring patterns in European top level soccer teams. Science and Football III, p.246-250. 1997.

Golub, G. H. e Van Loan, C. F. Matrix computations. Baltimore, Md.: Johns Hopkins University Press. 1989. xix, 642 p. p. (Johns Hopkins series in the mathematical sciences 3)

Grimshaw, P., et al. Sport and exercise biomechanics. New York: Taylor & Francis Group. 2006. 392 p.

Hennig, E. M. e Sterzing, T. F. The use of global positioning systems (GPS and DGPS) for the tracking of human motion. In: XVII Congress of the International Society of Biomechanics. Canada, 1999.

Hughes, M. e Churchill, S. Attacking profiles of sucessfull and unsuccessful team in Copa America 2001 In: T. Reilly, J. Cabri e D. Araújo (Ed.). Science and football V. London and New York: Routledge, 2005, p.222 - 228

Hughes, M. e Franks, I. Analysis of passing sequences, shots and goals in soccer. Journal of Sports Sciences, v.23, n.5, May, p.509-14. 2005.

Hughes, M. e Franks, I. M. Notational analysis of sport. London ; New York: E & FN Spon. 1997. 216 p.

Hughes, M. D. e Bartlett, R. M. The use of performance indicators in performance analysis. J Sports Sci., v.20, n.10, Oct, p.739-54. 2002.

Intille, S. S., Davis, J. W. e Bobick, A. F. Real-time closed-world tracking. In: Proceedings of the IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1997. 697-703.

Kim, H., et al. Where are the ball and players? Soccer game analysis with color-based tracking and image mosaick. In: Proc. International Conference on Image Analysis and Processing, 2000. 196-203.

Kim, S. Voronoi Analysis of a Soccer Game. Nonlinear Analysis: Modelling and Control, v.9, n.3, p.233-240. 2004.

_____. Player's positional dependence of fractal behaviors in a soccer game. Fractals-Complex Geometry Patterns and Scaling in Nature and Society, v.14, n.1, Mar, p.71-76. 2006.

Mcgarry, T., et al. Sport competition as a dynamical self-organizing system. J Sports Sci, v.20, n.10, Oct, p.771-81. 2002.

Mcgill, R., Tukey, J. W. e Larsen, W. A. Variations of box plots. The American Statistician, v.32, p.12-16. 1978.

Menezes, R. P., et al. Variability of the representation of soccer players' positions using Principal Components Analysis. In: XI Brazilian Congress of Biomechanics. João Pessoa, Brazil, 2005.

Misuta, M. S. Rastreamento automático de trajetórias de jogadores de futebol por videogrametria: validação do método e análise dos resultados. (Dissertação de Mestrado). UNICAMP, Campinas, 2004. 74 p.

Misuta, M. S. Analysis of the automatic tracking of players in collective sports. (Phd thesis). University of Campinas, Campinas, 2009. 130 p.

Mitchell, S. A. Approaches to Teaching Games: Improving invasion game performance. The Journal of Physical Education, Recreation and Dance, v.2, n.2, p.30-33. 1996.

Moura, F. A., et al. Quantitative analysis of futsal players' organization on the court. Portuguese Journal of Sport Sciences, v.11, n.2, p.105-108. 2011.

Moura, F. A., et al. Analysis of the shots to goal strategies of first division Brazilian professional soccer teams. Proceedings of the XXV International Symposium on Biomechanics in Sports, Ago 23 - 27, p.358-361. 2007.

Nakanishi, R., et al. An Approximate Computation of the Dominant Region Diagram for the Real-Time Analysis of Group Behaviors. Lecture Notes in Computer Science, v.5949, p.228-239. 2010.

Ohashi, J., et al. Application of an analysis system evaluating intermittent activity during a soccer match. In: W. Spinks, T. Reilly e A. Murphy (Ed.). Science and football IV. London: Routledge, 2002, p.132-136

Ohashi, J., et al. Measuring movement speeds and distances covered during soccer match-play. In: T. Reilly, A. Lees, K. Davids e W. J. Murphy (Ed.). Science and football : proceedings of the first World Congress of Science and Football. London: E. & F.N. Spon, 1988, p.449-455

- Okihara, K., et al. Compactness as a strategy in a soccer match in relation to a change in offence and defense. Journal of Sports Sciences, v.22, n.6, p.515. 2004.
- Preparata, F. P. e Shamos, M. I. Computational geometry : an introduction. New York: Springer-Verlag. 1985. xii, 390 p. p. (Texts and monographs in computer science)
- Rampinini, E., et al. Technical performance during soccer matches of the Italian Serie A league: effect of fatigue and competitive level. Journal of Science and Medicine in Sport, v.12, n.1, Jan, p.227-33. 2009.
- Reep, C. e Benjamin, B. Skill and chance in association football. Journal of the Royal Statistical Society, v.134, p.581-585. 1968.
- Reilly, T. Introduction to science and soccer. In: T. Reilly (Ed.). Science and Soccer. London: E & FN Spon, 1996, p.1-7
- Reilly, T. e Thomas, V. A motion analysis work-rate in different positional roles in professional football match-play. Journal of Human Movement Studies, v.2, p.87-97. 1976.
- Santana, J. E. Representação da área de responsabilidade de jogadores de futebol através do Diagrama de Voronoi. (Dissertação de mestrado). UNICAMP, Campinas, 2011. 61 p.
- Seabra, F. e Dantas, L. E. P. B. T. Space definition for match analysis in soccer. International Journal of Performance Analysis in Sport, v.6, n.12, p.97-113. 2006.
- Stolen, T., et al. Physiology of soccer: an update. Sports Medicine, v.35, n.6, p.501-36. 2005.
- Szwarcfiter, J. L. Grafos e algoritmos computacionais. Rio de Janeiro: Campus. 1984
- Withers, R. T., et al. Match analysis of Australian professional soccer players. Journal of Human Movement Studies, v.8, p.159-176. 1982.
- Yamanaka, K., Hughes, M. e Lott, M. An analysis of playing patterns in the 1990 World Cup for Association Football. Science and Football II p.206-214. 1993.
- Yue, Z., et al. Mathematical Analysis of a Soccer Game. Part I: Individual and Collective Behaviors. Studies in Applied Mathematics, v.121, n.3, Oct, p.223-243. 2008a.
- _____. Mathematical Analysis of a Soccer Game. Part II: Energy, Spectral, and Correlation Analyses. Studies in Applied Mathematics, v.121, n.3, Oct, p.245-261. 2008b.

Apêndices

Apêndice I. Descrição das classificações finais de cada equipe nos campeonatos em que foram analisados e o número de câmeras utilizadas durante a coleta de dados.

Jogo	Número de câmeras utilizadas na coleta de dados	Equipes envolvidas	Ano de ocorrência do jogo	Campeonato	Classificação final no campeonato*
Jogo 1	6	<i>tm1</i>	2004	Paulista - 1º divisão	Entre os quatro primeiros
		<i>tm2</i>	2004	Paulista - 1º divisão	Entre o 13º e 16º colocado
Jogo 2	4	<i>tm3</i>	2003	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 13º e 16º colocado
		<i>tm4</i>	2003	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 17º e 20º colocado
Jogo 3	4	<i>tm5</i>	2001	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 17º e 20º colocado
		<i>tm6</i>	2001	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 25º e 28º colocado
Jogo 4	4	<i>tm7</i>	2003	Brasileiro - 1ª divisão	Entre os quatro primeiros
		<i>tm8</i>	2003	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 13º e 16º colocado
Jogo 5	6	<i>tm9</i>	2008	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 13º e 16º colocado
		<i>tm10</i>	2008	Brasileiro - 1ª divisão	Entre os quatro primeiros
Jogo 6	6	<i>tm11</i>	2008	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 13º e 16º colocado
		<i>tm12</i>	2008	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 9º e 12º colocado
Jogo 7	6	<i>tm13</i>	2008	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 13º e 16º colocado
		<i>tm14</i>	2008	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 5º e 8º colocado
Jogo 8	6	<i>tm15</i>	2008	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 13º e 16º colocado
		<i>tm16</i>	2008	Brasileiro - 1ª divisão	Entre os quatro primeiros
Jogo 9	4	<i>tm17</i>	2004	Brasileiro - 1ª divisão	Entre os quatro primeiros
		<i>tm18</i>	2004	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 17º e 20º colocado
Jogo 10	6	<i>tm19</i>	2004	Brasileiro - 1ª divisão	Entre os quatro primeiros
		<i>tm20</i>	2004	Brasileiro - 1ª divisão	Entre o 9º e 12º colocado

* A classificação exata das equipes não foi descrita com o propósito de manter a identificação das equipes em sigilo.

Apêndice II. Valores de mediana da tabela 2.1 normalizados pelos valores máximos possíveis
 $(\frac{\text{valor de mediana}}{\text{valor máximo possível}})$ para cada jogo.

Times	Espalhamento		Área de ocupação	
	Com posse	Sem posse	Com posse	Sem posse
<i>tm1</i>	0,30	0,27	0,15	0,13
<i>tm2</i>	0,29	0,28	0,14	0,12
<i>tm3</i>	0,30	0,29	0,15	0,14
<i>tm4</i>	0,29	0,27	0,15	0,12
<i>tm5</i>	0,31	0,29	0,16	0,13
<i>tm6</i>	0,29	0,27	0,14	0,11
<i>tm7</i>	0,31	0,28	0,16	0,13
<i>tm8</i>	0,30	0,28	0,15	0,13
<i>tm9</i>	0,29	0,27	0,14	0,12
<i>tm10</i>	0,28	0,26	0,14	0,11
<i>tm11</i>	0,29	0,27	0,14	0,12
<i>tm12</i>	0,28	0,27	0,14	0,11
<i>tm13</i>	0,29	0,26	0,14	0,11
<i>tm14</i>	0,28	0,27	0,14	0,12
<i>tm15</i>	0,29	0,27	0,14	0,12
<i>tm16</i>	0,27	0,26	0,13	0,11

Anexo I

Os anexos I e II desta tese de doutorado pertencem ao material desenvolvido pelo Prof. Dr. Paulo Régis Caron Ruffino, durante uma reunião no dia 28/11/11, em que estiveram presentes o autor desta tese (Prof. Felipe Arruda Moura) e seu orientador (Prof. Dr. Sergio Augusto Cunha).

Sobre o valor máximo do operador espalhamento:

PARTE I

Regularizando o campo (arredondando os cantos para tornar a fronteira do campo diferenciável) e chamando esse novo "retângulo suavizado" de C , a configuração dos 10 jogadores está no produto cartesiano C^{10} (contido em \mathbb{R}^{20}). O operador espalhamento está, portanto, definido em C^{10} . Os pontos de máximo e mínimo de qualquer operador diferenciável em C^{10} são pontos críticos (derivada nula, onde a derivada aqui é o gradiente) desse operador: ou no interior de C^{10} ou ponto crítico da fronteira. No nosso caso, o único ponto crítico no interior (a origem, que na verdade é ponto crítico do quadrado do operador, já que o operador é diferenciável em todo ponto menos na origem) não é de máximo (é de mínimo), portanto precisamos procurar pontos críticos não no interior, mas na fronteira de C^{10} .

O chamado método de multiplicadores de Lagrange diz que, neste caso, os pontos críticos são aqueles onde o gradiente do operador é ortogonal à fronteira (daí a necessidade de, por enquanto, regularizar nos cantos). O gradiente do operador em questão tem direção radial saindo da origem. Dessa forma, concluímos que, dos pontos críticos na fronteira, os pontos de máximo são aqueles que aparecem com pontos (jogadores) nos cantos que regularizamos, i.e. os pontos de máximos são quando os jogadores estão efetivamente nos cantos do campo (Repare que no ponto médio de cada um dos lados de C temos também pontos críticos, mas que também não são de máximo!).

PARTE II (análise combinatória)

Daqui pra frente, achar exatamente a distribuição, i.e. quantos jogadores ficam em cada canto para maximizar o operador, é um problema de combinatória finita: distribuir 10 jogadores em 4 cantos. Existem exatamente 286 maneiras de se decompor o número 10 como soma de 4 (número de cantos) números (anexo II), onde a ordem das parcelas é importante ser considerada (exemplo: $5+0+5+0$ é diferente de $5+5+0+0$). Vamos mostrar que a distribuição que maximiza o operador é com 5 jogadores colocados diagonalmente de outros 5 jogadores ($5+0+5+0$ ou com $0+5+0+5$).

De fato, das 286 possibilidades, considere cada um desses casos especiais:

1) Dentre todas as configurações onde temos distribuição concentrada em apenas uma das diagonais, é óbvio que aquelas com $5+5$ a maximiza. Assim, o máximo, neste caso, é obtido em exatamente 2 configurações (qualquer uma das duas diagonais).

2) Dentre todas as configurações onde temos um canto com zero ponto (jogador), cada ponto diagonalmente oposto dessa posição pode ser redistribuído, um a um, para um dos pontos da outra diagonal de tal maneira que o operador, em cada transferência um a um dos jogadores, fica igual (pelo teorema de Pitágoras) ou maior que a distribuição inicial. Podemos então, passo a passo (ponto a ponto, i.e. jogador a jogador) transformar a distribuição inicial em outra que seja concentrada na diagonal, com o operador espalhamento maior ou igual ao da distribuição inicial. Agora aplica o item 1 acima.

3) Dada uma configuração que não tem nenhum canto com zero jogador. Escolha a diagonal principal como aquela com maior soma. Tome um par de pontos opostos na diagonal secundária, então, de novo por Pitágoras, esse par de pontos pode ser deslocado para cantos opostos da diagonal principal de tal maneira que o operador (mais uma vez) fica maior ou igual o valor anterior. Repita esse procedimento até zerar pelo menos um dos cantos. Depois de zerado um canto, use o item (2) acima.

Isso conclui a demonstração.

Anexo II

Decomposição de números em parcelas:

O objetivo dessas notas é sabermos de quantas maneiras diferentes um número natural $n \geq 0$ pode ser escrito como soma de $m \geq 1$ parcelas de números naturais. Aqui a ordem das parcelas é relevante. Por exemplo, $5 + 0 + 5 + 0$ é diferente de $0 + 5 + 0 + 5$. Exemplo de aplicação disso é resolver o seguinte problema: de quantas maneiras distintas podemos distribuir 10 jogadores iguais nos quatro cantos de um campo de futebol?

Aqui, como pode ser observado no exemplo acima, não é o mesmo que perguntarmos de quantas maneiras diferentes um conjunto, com n elementos, pode ser escrito como união de m subconjuntos disjuntos. O fato de não distinguirmos os elementos do conjunto ("os jogadores são iguais"), é o que torna o problema mais difícil. Distinguindo os elementos do conjunto, cada elemento tem m alternativas de subconjuntos para estar contido, assim, neste caso a solução seria simplesmente m^n . No caso dos jogadores, se identificarmos cada um deles, o número de possibilidades de distribuição seria simplesmente m^n .

Voltemos então ao problema original.

Definição 1 (Notação). *Dado dois números naturais $n \geq 0$ e $m \geq 1$, denotaremos por $\#(n, m)$ o número de maneiras distintas possíveis de se escrever o número n como m parcelas de números naturais, considerando a ordem das parcelas.*

Propriedades Básicas:

1. $\#(0, m) = 1$.
2. $\#(1, m) = m$.
3. $\#(n, 1) = 1$.
4. $\#(n, 2) = n + 1$.

5. Se $m \geq 2$ então

$$(n, m) = \sum_{i=0}^n \#(i, m-1)$$

6. Se $m \geq 3$ então

$$(n, m) = \sum_{i=0}^n (n+1-i) \#(i, m-2)$$

Exemplo:

Para o caso $n = 10$ e $m = 4$ (distribuição de jogadores em 4 cantos de um campo de futebol), as fórmulas (6) e (4) acima fornecem $\#(10, 4) = 286$.