

Canais de Difusão em Teoria da Informação: Uma Análise Bibliométrica

Pedro Henrique Camargo de Abreu e José Carlos Magossi

Resumo—A implementação de sistemas de comunicação fundamenta-se em aspectos matemáticos, probabilísticos, teóricos e práticos, para que a transmissão de mensagens possa ocorrer de maneira confiável. A Teoria da Informação é a área de pesquisa que se ocupa, grosso modo, “daquilo que pode ser feito” em termos teóricos, com vistas ao desenvolvimento dos modelos matemáticos de comunicação. Como em todo campo de pesquisa, alguns impedimentos nos desenvolvimentos residem em seus problemas abertos, assiduamente investigados. Como um exemplo importante, pode-se citar o caso do canal de difusão (*broadcast channel*), um problema teórico com inúmeras aplicações no campo da tecnologia. Devido às diversas vertentes resultantes dessa importante área de pesquisa tecnológica, apresenta-se, nesse texto, uma análise bibliométrica desse problema com vistas a identificar áreas promissoras de pesquisa e também os locais onde essas pesquisas têm sido desenvolvidas. O objetivo é esboçar um cenário de modo a facilitar a busca por soluções dos problemas abertos. Deve-se ter cuidado nessas análises, pois elas não garantem exatidão na escolha da linha mais promissora; no entanto, auxiliam na identificação do fluxo das investigações. Ao final, faz-se uma descrição de possíveis tendências de pesquisa e lista-se alguns problemas abertos.

Palavras-chave—Bibliometria, *Broadcast channel*, Teoria da Informação, Indicadores de produção científica, Colaboração científica.

I. INTRODUÇÃO

A Teoria da Informação nasceu, diga-se, do trabalho de Claude E. Shannon, “*A mathematical theory of communication*”, publicado em 1948¹. É rica a trajetória histórica dos propositores dos modelos de sistemas de comunicação. Neste caso, deve-se notar que Norbert Wiener [1] também forneceu um modelo para comunicação.

Uma das disciplinas para as quais o trabalho de Wiener sobre comunicação forneceu uma nova maneira de pensar, foi o estudo da linguagem [2], uma vez que ele apresentou uma ideia revolucionária em uma sentença clara: “a mensagem, para transmitir informações, deve representar uma escolha entre mensagens possíveis” [1]. Wiener também afirmava que uma mensagem pode ser compreendida como “uma sequência discreta ou contínua de eventos mensuráveis distribuídos no tempo” [3].

A Teoria da Informação de Shannon contempla um modelo onde há emissor, canal, ruídos, receptor e processos de codificação de mensagens, além é claro, da fórmula $H(X) = -\sum_{i=1}^n p_i \log p_i$ para “medir informação”, denominada por ele de *entropia*. Ralph V. L. Hartley apresentou em 1928 uma fórmula semelhante à de Shannon, na caracterização de sua medida de informação, mas considerou uma definição de informação com eventos equiprováveis [4].

Na teoria de Shannon, o principal objetivo é o estudo dos limites na transmissão confiável de mensagens através de um canal de comunicação ruidoso [5], que inclui uma série de novos conceitos em comparação com os estudos anteriores em comunicação, tais como “o efeito do ruído no canal, e as economias possíveis devido à estrutura estatística da mensagem original e devido à natureza do destino final da informação” [6].

Como ocorre também em outros ramos da Matemática, a Teoria da Informação tem uma origem física, dado que suas investigações foram iniciadas por cientistas de Comunicações que estudavam a estrutura estatística dos equipamentos de comunicação elétrica [7]. Shannon, no entanto, trabalhou com mensagens que eram transmitidas por um fio ou através da atmosfera usando sinais eletromagnéticos, como os encontrados em sinais de rádio ou televisão [8].

Em vista disso, em seu início, o principal papel da Teoria da Informação era fornecer às comunidades científicas, e de engenharia, um delineamento matemático para a Teoria da Comunicação, estabelecendo os limites fundamentais no desempenho de vários sistemas [9]. No entanto, ela causou um impacto profundo em outras áreas além da Matemática e da Engenharia Elétrica, se estendendo, por exemplo, à Ciência da Computação, Física, Filosofia, Artes e Economia [10]. Portanto, a Teoria da Informação não restringe-se apenas ao domínio da Teoria da Comunicação [11].

É possível defender a afirmação de que a Teoria da Informação é essencialmente o estudo de um teorema, o *Teorema Fundamental da Teoria da Informação*, que afirma que “é possível transmitir informação através de um canal ruidoso a qualquer taxa menor do que a capacidade de canal, com uma probabilidade de erro arbitrariamente pequena” [12].

Diversos resultados foram estabelecidos para várias configurações de modelos de comunicação, no entanto, alguns problemas permanecem em aberto. No artigo de Shannon, de 1948, o objetivo era “reproduzir em um ponto, exatamente ou

P. H. C. de Abreu é mestrando na Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Limeira, SP, Brasil (e-mail: p228049@dac.unicamp.br).

J. C. Magossi é professor na Faculdade de Tecnologia (FT) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Limeira, SP, Brasil (e-mail: magossi@ft.unicamp.br).

¹ C. E. Shannon, “A mathematical theory of communication,” *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423 (July), pp. 623-656 (October), 1948.

aproximadamente, uma mensagem selecionada em outro ponto²” [6].

Shannon não abordou o problema que envolve mais de um emissor ou mais de um receptor. Por sua vez, Thomas M. Cover, em 1972³, descreve no artigo intitulado “*Broadcast channels*”, o problema da transmissão de informações de uma única fonte para vários receptores [13]. Essa configuração de modelo de comunicação ilustra o que ocorre, por exemplo, com uma estação de TV e inúmeros televisores, ou, para efeito didático, a comunicação de um professor, em uma sala de aula a vários alunos [10].

No modelo de Shannon, a entropia “mede” a incerteza presente na mensagem a ser transmitida (*a priori*), que se transforma em quantidade de informação (*a posteriori*) após o experimento ter sido realizado. Assim, um canal é caracterizado por uma matriz de probabilidades condicionais, e segundo Shannon, é possível transmitir uma mensagem com uma probabilidade de erro muito baixa e reconstruir a mensagem de origem na saída do canal. A taxa máxima na qual isso pode ser feito é chamada de *capacidade de canal* [6]. No entanto, quando se trata de canais de difusão (*broadcast channels*) é preciso considerar que a informação deve ser transmitida para mais de um receptor, ou seja, deve-se elaborar codificações para canais com capacidades distintas. Dessa forma, tem origem o problema de determinar qual é a *região de capacidade de canal* que compreenda as capacidades individuais dos diferentes canais de comunicação entre um emissor e vários receptores.

Para alguns casos de estudo, a região de capacidade para as taxas alcançáveis entre emissor e receptor já é matematicamente conhecida. No entanto, a região de capacidade para o caso geral ainda é desconhecida [14]–[16].

Há diversos autores de destaque na comunidade acadêmica que abordam canais de difusão, sendo pertinente mencionar: Abbas El Gamal, Andrea Goldsmith, Chandra Nair, Shlomo Shamai, Yanlin Geng, entre outros. É essencial registrar que estes autores investigam diversos casos de estudo e configurações específicas de canais de difusão que apresentam algumas variações quando comparados com o caso geral de *broadcast channel*, tais como: canais de difusão degradados (*degraded broadcast channels*), canais de difusão determinísticos (*deterministic broadcast channels*), canais de difusão com desvanecimento (*fading broadcast channels*), canais de difusão de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*MIMO broadcast channels*) etc.

Atualmente, esse problema é de suma importância tanto para a academia quanto para a indústria de tecnologia, haja vista que, a ideia de um emissor para muitos receptores é bem recorrente nos meios de comunicação modernos e em vários setores da tecnologia. Para [17], uma das principais motivações para o estudo de tais canais é que ele (o estudo) fornece modelos para diversos casos de comunicação, como o enlace de descida (*downlink*) de um sistema celular ou troca de dados em uma rede local (LAN) sem fio.

Assim, o conceito de *broadcast channel* em Teoria da Informação pode ser compreendido como um dos problemas abertos de maior interesse na comunidade acadêmica, em decorrência da sua diversidade de aplicações tecnológicas.

Para [10], no sistema de comunicações em que há um único emissor e muitos receptores, coloca-se em evidência as seguintes questões:

- Como o emissor codifica informações direcionadas a diferentes receptores em um sinal comum?
- Quais são as taxas em que as informações podem ser enviadas para os diferentes receptores?

Em [13] é apresentado um modelo de canal de difusão geral com k receptores, que é reproduzido na Fig. 1 a seguir.

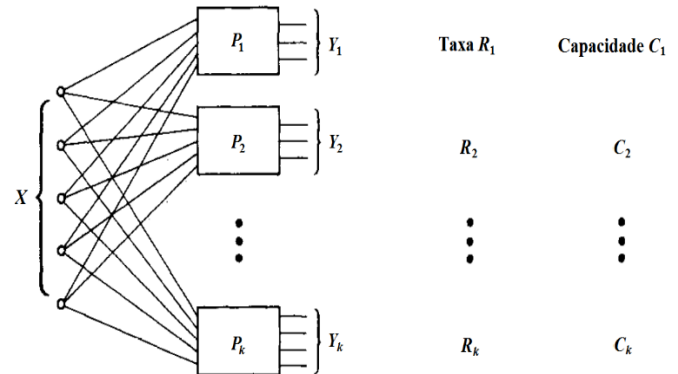


Fig. 1. Primeira representação de um canal de difusão na literatura. Adaptado de [13].

O problema básico é o de encontrar o conjunto de taxas simultaneamente alcançáveis (R_1, R_2, \dots, R_k) . O *background* básico para a comunicação por difusão é marcado pelas abordagens *maximin* e *tempo compartilhado* [13].

Ao considerar que os canais de transmissão para os k receptores tenham as respectivas capacidades de canal C_1, C_2, \dots, C_k em *bits* por segundo, tem-se uma primeira abordagem, trivial, a abordagem *maximin*: $C_{\min} = \min\{C_1, C_2, \dots, C_k\}$. Se os canais forem “compatíveis”, cada receptor entenderá perfeitamente a taxa $R = C_{\min}$ *bits/seg*. Aqui, a taxa de transmissão é limitada pelo “pior canal”. No outro extremo, a informação poderia ser enviada a uma taxa $R = C_{\max}$, com taxas resultantes $R_i = 0, i = 1, 2, \dots, k - 1$, para todos, exceto o “melhor canal”, e taxa $R_k = C_{\max}$ para o “melhor canal” [18].

Uma outra ideia poderia ser a do tempo compartilhado. Alocam-se proporções de tempo $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_k, \lambda_i \geq 0, \sum \lambda_i = 1$, para transmissão nas capacidades C_1, C_2, \dots, C_k . Assumindo-se compatibilidade dos canais e que $C_1 \leq C_2 \leq \dots \leq C_k$, tem-se então que a taxa de transmissão de informação através do canal i é dada por

$$R_i = \sum_{j \leq i} \lambda_j C_j, \quad i = 1, 2, \dots, k. \quad (1)$$

² Trecho original (em inglês): “*the fundamental problem of communication is that of reproducing at one point either exactly or approximately a message selected at another point*”.

³ T. M. Cover, “Broadcast channels,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 2-14, 1972.

A relevância das investigações em canais de difusão baseia-se na ideia de que essas regiões de taxas alcançáveis podem ser excedidas pela codificação ideal [18]. Em [14], pág. 2524, é exposta a seguinte definição de um canal de difusão discreto sem memória (*discrete memoryless broadcast channel*) de 2 receptores:

Um canal de difusão é composto por um alfabeto de entrada \mathcal{X} , dois alfabetos de saída \mathcal{Y}_1 e \mathcal{Y}_2 , e uma função de transição de probabilidade $p(y_1, y_2 | x)$. O canal de difusão é considerado sem memória se

$$p(y_1^n, y_2^n | x^n) = \prod_{i=1}^n p(y_{1i}, y_{2i} | x_i). \quad (2)$$

Um código $((2^{nR_1}, 2^{nR_2}), n)$ para um canal de difusão com informações independentes, consiste em um codificador

$$x^n: 2^{nR_1} \times 2^{nR_2} \rightarrow \mathcal{X}^n, \quad (3)$$

e dois decodificadores

$$\hat{M}_1: \mathcal{Y}_1^n \rightarrow 2^{nR_1}, \quad (4)$$

$$\hat{M}_2: \mathcal{Y}_2^n \rightarrow 2^{nR_2}. \quad (5)$$

A probabilidade de erro $P_e^{(n)}$ é definida como sendo a probabilidade da mensagem decodificada ser diferente da mensagem transmitida, ou seja

$$P_e^{(n)} = P(\hat{M}_1(Y_1^n) \neq M_1 \text{ ou } \hat{M}_2(Y_2^n) \neq M_2), \quad (6)$$

em que a mensagem (M_1, M_2) é assumida como uniformemente distribuída sobre $2^{nR_1} \times 2^{nR_2}$.

Para canais de difusão com um emissor e dois receptores, um par de taxas (R_1, R_2) é alcançável se existir um esquema de codificação para o qual a probabilidade de erro de ambos os usuários tenda a zero à medida que o comprimento do bloco de código aumente [15], [19]. Como o canal de difusão é um sistema multiusuário, seu limite de comunicação é dado por uma *região de capacidade*, que compreende o “fechamento” (união) do conjunto de todas as taxas alcançáveis, caracterizando a troca ideal entre taxas de dados simultaneamente alcançáveis [14], [17].

Como o objetivo, neste artigo, é lançar as bases para estudos sobre canais de difusão, faz-se uma análise bibliométrica com foco em canais de difusão. As inúmeras bases de dados fornecem um grande acervo para pesquisa, possibilitando que a comunidade científica e acadêmica reconheça os esforços dos autores [20].

As análises bibliométricas podem ser aplicadas para acompanhar as tendências de desenvolvimento científico, propiciando a identificação de influências nas publicações e estimulando a geração de comparações a partir das contribuições proporcionadas por diferentes pesquisadores de um determinado campo de pesquisa [21]. A avaliação

bibliométrica oferece uma abordagem confiável e eficiente para a localização e verificação dos principais documentos científicos relacionados ao domínio de interesse [22].

A bibliometria vem sendo comumente empregada como um método de análise quantitativa de pesquisa científica, na medida em que os dados estatísticos obtidos por meio de estudos bibliométricos mensuram a contribuição do conhecimento científico proveniente das publicações de uma dada área do conhecimento. Esses dados podem ser utilizados na representação das tendências atuais de pesquisa ou na identificação de temas para pesquisas futuras, visando uma continuidade e uma expansão do estado da arte [23], [24].

Com o intuito de fornecer subsídios à pesquisa em canais de difusão, a seguinte pergunta torna-se relevante: “qual é o cenário histórico mundial da produção científica sobre canais de difusão?”. O objetivo, neste artigo, consiste em elaborar um levantamento histórico do desenvolvimento de pesquisas sobre canais de difusão e evidenciar alguns pontos relevantes na busca por respostas à problemas correlatos ainda sem solução.

Portanto, os aspectos metodológicos e as etapas da pesquisa foram definidos com a finalidade de estabelecer um encadeamento entre os problemas relacionados aos canais de difusão e suas respectivas publicações. Com isso, espera-se consolidar um cenário onde a elaboração de estratégias de pesquisa sobre *broadcast channels* sejam facilitadas, bem como o conhecimento dos locais no mundo, onde essas pesquisas estão sendo realizadas, favorecendo as possíveis trocas de informações com pesquisadores de outras instituições.

II. METODOLOGIA

O presente artigo caracteriza-se pelo desenvolvimento de uma análise bibliométrica com caráter quantitativo acerca da produção científica sobre canais de difusão em Teoria da Informação. Os indicadores apresentados foram obtidos por meio de buscas realizadas nas bases de dados *Scopus*[®] (*Elsevier BV*) e *Web of Science*[™] *Thomson Reuters* (conhecida anteriormente como *ISI Web of Knowledge*).

As etapas para a condução da análise bibliométrica seguiram o fluxo do esquema representado na Fig. 2. É importante destacar a utilização do *software VOSviewer* (versão 1.6.10) para a formulação de gráficos de redes de colaboração diante dos indicadores de produção científica obtidos pelas buscas nas bases de dados. No entanto, é essencial explicitar que este não é o único *software* disponível para tal finalidade, visto que as análises bibliométricas também podem ser conduzidas utilizando outros pacotes de *software*, tais como: *CiteSpace*, *Publish or Perish*, *HistCite*, *BibExcel* e *Gephi*. Fica a critério do pesquisador definir qual a ferramenta mais adequada para atender aos objetivos de pesquisa.

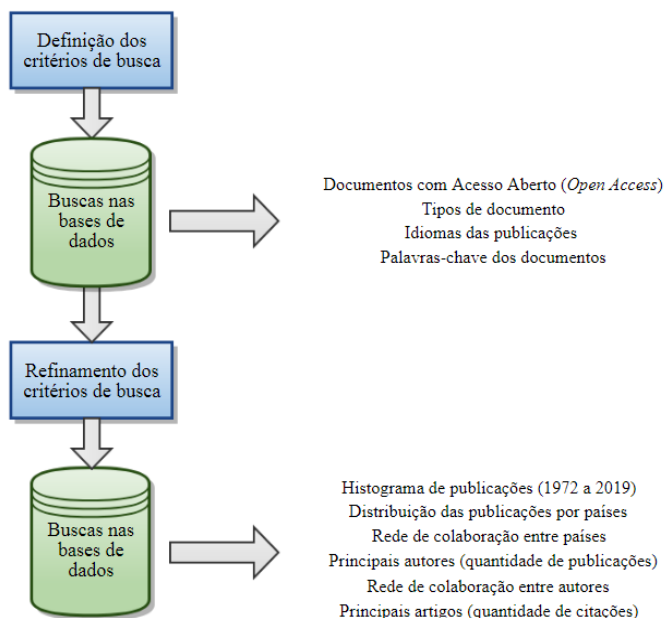


Fig. 2. Etapas da análise bibliométrica e os respectivos indicadores obtidos.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com relação aos critérios utilizados na busca, inicialmente foram definidos apenas parâmetros para Título (deveria conter “*broadcast channel*”) e Tópico (deveria conter “*information theory*” no título e/ou *abstract* e/ou palavras-chave). Esses critérios foram estabelecidos com o objetivo de obter a recuperação do maior número possível de trabalhos que tratavam do objeto de pesquisa. Vale ressaltar que as buscas nas bases de dados foram realizadas no dia 13 de março de 2019.

Sendo assim, após a inserção destes critérios, foram obtidos 977 documentos na *Scopus* e 63 documentos na *WOS*. A publicação mais antiga disponível na *Scopus* é o artigo seminal de Cover publicado em 1972. Por outro lado, o documento mais antigo disponível na *WOS* é outro artigo de Cover, intitulado “*Comments on broadcast channels*”, publicado em 1998⁴.

A fim de realizar uma análise inicial da amostra de publicações, identificou-se que dentre os 63 documentos indexados na *WOS*, apenas 5 não estavam disponíveis na base *Scopus*. Portanto, neste primeiro momento, a análise compreende uma amostra de 982 documentos (977 da *Scopus* e 5 da *WOS*). Com relação ao tipo de acesso a esses documentos, identificou-se que apenas 27 (2,7%) possuíam Acesso Aberto

(*Open Access*).

A distribuição do tipo de documento apontou que a grande maioria dos trabalhos são documentos de conferência (653; 66,5%), sendo pertinente ressaltar que as conferências do *IEEE* compreendem importantes meios de veiculação para documentos na área de Teoria da Informação. O restante dos trabalhos foi publicado na forma de artigos em periódicos (317; 32,3%), cartas (3; 0,3%), erratas (2; 0,2%), relatórios (2; 0,2%), capítulo de livro (1; 0,1%), artigo no prelo (1; 0,1%), nota (1; 0,1%) e revisão (1; 0,1%).

Os documentos em questão, foram escritos em seis idiomas, sendo Inglês o principal idioma das publicações (961; 97,9%), tendo em vista que grande parte dos *journals* e demais meios de impacto, qualidade e reputação (dados pelos indicadores *SJR* e *JCR*) publicam artigos na língua inglesa. Os demais documentos foram escritos em Russo (12; 1,2%), Chinês (5; 0,5%), Japonês (2; 0,2%), Francês (1; 0,1%) e Polonês (1; 0,1%).

A. Análise de palavras-chave e refinamento dos critérios de busca

Desde os primeiros trabalhos com bibliometria, a análise de palavras-chave sempre foi compreendida como uma atividade fundamental [25], tendo em vista que ela pode propiciar a dedução de novos indicadores, promovendo assim, um aprimoramento no desenvolvimento de pesquisas sobre o objeto de estudo de interesse [26].

Portanto, é importante verificar as palavras-chave mais recorrentes nas publicações, uma vez que elas representam elementos fundamentais para a realização de pesquisas mais específicas sobre o tema. Dessa forma, as 10 palavras-chave mais recorrentes e a respectiva quantidade de documentos em que ocorriam na base de dados *Scopus* foram: “*broadcasting*” (588); “*communication channels (information theory)*” (547); “*broadcast channels*” (437); “*information theory*” (372); “*codes (symbols)*” (338); “*MIMO systems*” (167); “*radio broadcasting*” (166); “*channel state information*” (164); “*signal receivers*” (155); e “*capacity regions*” (134).

Na Fig. 3 apresenta-se um gráfico de rede em que enfatiza-se a densidade de ocorrência das palavras-chave na base de dados *Scopus*. Para a elaboração do gráfico em questão, foram consideradas apenas aquelas palavras que apresentavam um mínimo de 30 ocorrências, o que constitui uma amostra de 58 palavras-chave.

⁴ T. M. Cover, “Comments on broadcast channels,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, no. 6, pp. 2524-2530, 1998.

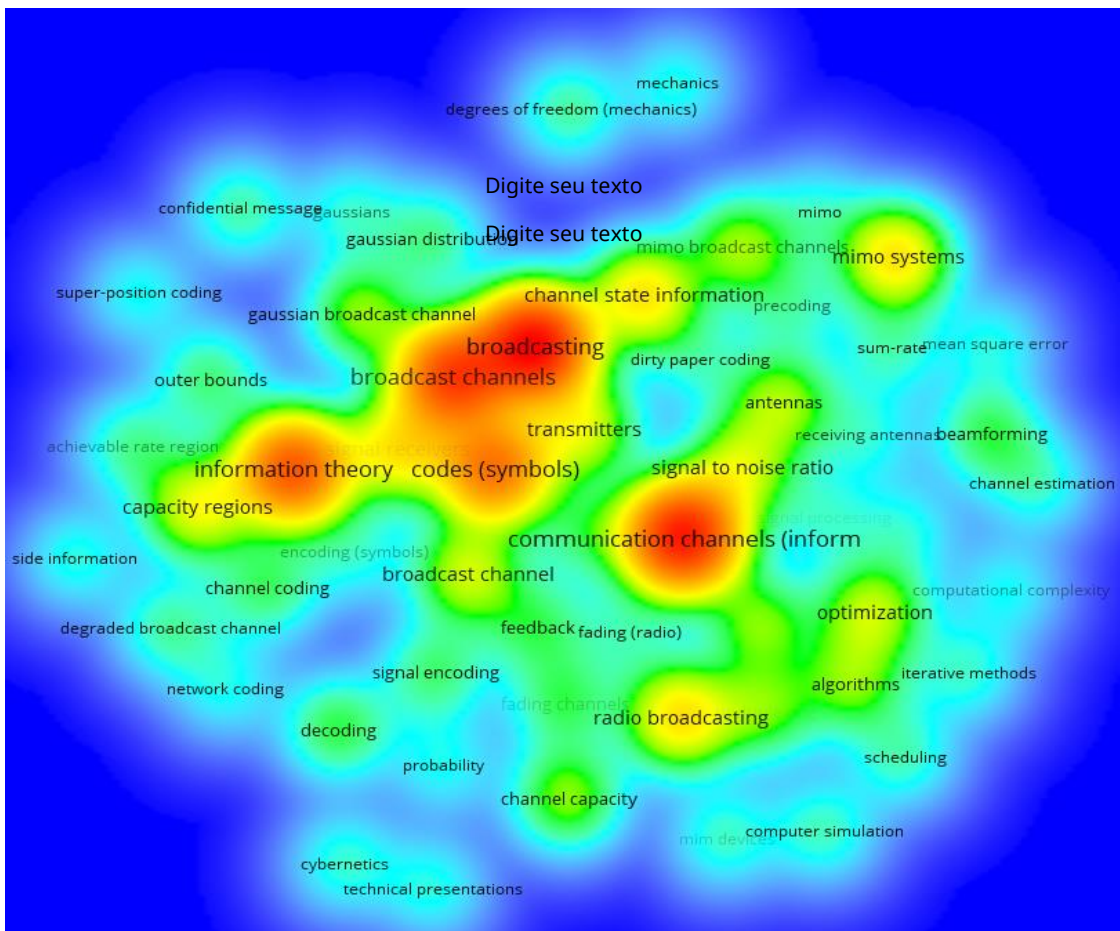


Fig. 3. Gráfico de densidade de ocorrência de palavras-chave.

As cores no gráfico da Fig. 3 estão associadas à frequência de ocorrência das palavras-chave, ou seja, elas são categorizadas em ordem decrescente de ocorrência: vermelho (maior ocorrência), amarelo, verde e azul (menor ocorrência). A proximidade com que as palavras-chave são exibidas no gráfico relaciona-se com a sua coocorrência, ou seja, com a ocorrência conjunta das palavras-chave nos mesmos artigos (como uma forma de “colaboração”).

A Subseção B apresenta uma análise descritiva dos dados obtidos. Para sua construção, foram desconsiderados documentos dos seguintes tipos: cartas, erratas, capítulo de livro, artigo no prelo e notas. Além disso, desconsiderou-se também os seguintes tipos de fonte: livros, séries de livros e relatórios.

Para isso, adotou-se o seguinte filtro de busca na base de dados *Scopus*:

```
( TITLE ( broadcast AND channel ) AND TITLE-ABS-KEY ( information AND theory ) ) AND ( EXCLUDE ( DOCTYPE , "ip" ) OR EXCLUDE ( DOCTYPE , "le" ) OR EXCLUDE ( DOCTYPE , "er" ) OR EXCLUDE ( DOCTYPE , "ch" ) OR EXCLUDE ( DOCTYPE , "no" ) ) AND ( EXCLUDE ( SRCTYPE , "k" ) OR EXCLUDE ( SRCTYPE , "r" ) OR EXCLUDE ( SRCTYPE , "b" ) )
```

Com relação à base de dados *WOS*, considerou-se apenas os 5 artigos que não estavam disponíveis na base *Scopus*, pois, conforme mencionado anteriormente, 58 dos 63 artigos (92%) da *WOS* também estão indexados na *Scopus*. Essa atualização nos critérios de seleção foi realizada com a intenção de construir indicadores mais relevantes de produção científica. Dessa forma, a quantidade de documentos foi reduzida de 982 a 961, evidenciando-se assim, o descarte de 21 documentos científicos.

B. Indicadores de produção e redes de colaboração científica

Inicialmente, é essencial desenvolver uma análise histórica do período do surgimento do conceito de canais de difusão em Teoria da Informação que, conforme citado anteriormente, iniciou-se em 1972; passando assim, por períodos de muita e de pouca atenção ao tema.

Na Fig. 4 apresenta-se a frequência absoluta (histograma) de publicações no período de 1972 a 2019.

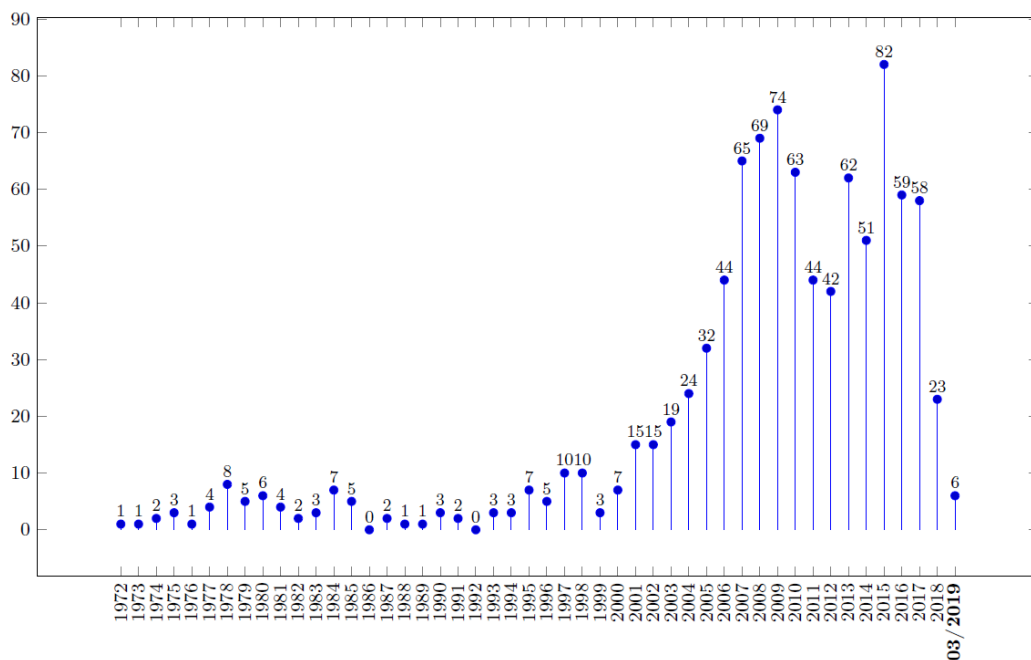


Fig. 4. Gráfico de frequência absoluta de publicações no período de 1972 a 2019.

Por meio da análise da Fig. 4, torna-se evidente o crescimento “exponencial” de publicações a partir do século XXI e, apesar dos anos 2011 e 2012 apresentarem queda considerável na quantidade de publicações (diminuição de 35% a 40% em comparação com os dois anos anteriores), a média de 55,8 publicações anuais nos últimos 10 anos (2009 a 2018), constitui um valor bem alto quando comparado às décadas

anteriores, principalmente em relação ao século XX. Vale mencionar que as 6 publicações do ano de 2019 levam em consideração apenas documentos já publicados e indexados nas bases *Scopus* e/ou *WOS* no dia 13 de março de 2019.

Na Fig. 5 apresenta-se uma distribuição das publicações levando-se em conta os países envolvidos.

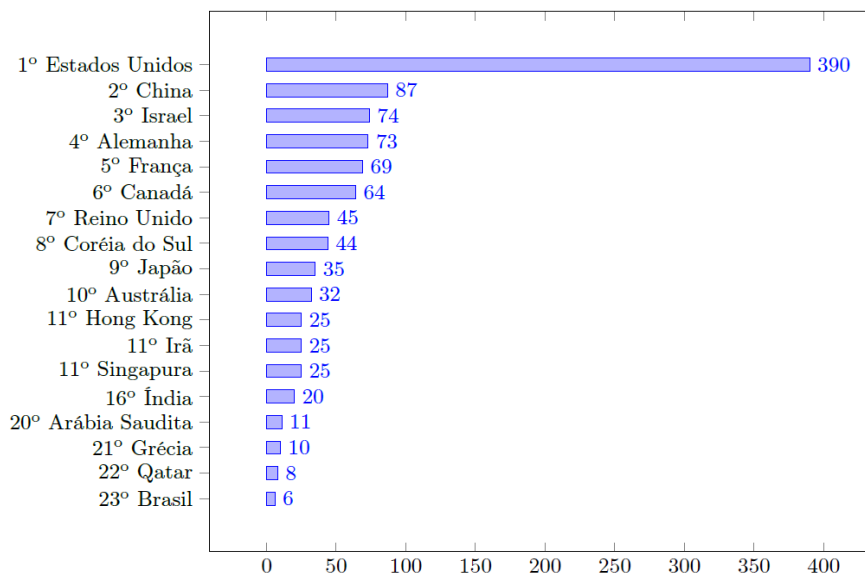


Fig. 5. Gráfico de distribuição de publicações por país no período de 1972 a 2019.

A estratificação das publicações segundo os países das instituições de afiliação dos autores, indica que países de diversos continentes estão engajados em pesquisas sobre canais de difusão, mas evidencia um predomínio dos autores estadunidenses, dado que 390 publicações contam com ao menos um autor vinculado a uma instituição dos Estados Unidos, o equivalente a 40,6% de todas as publicações sobre o assunto no mundo. Mesmo que 2015 tenha sido o ano com mais

publicações sobre canais de difusão, o ano que contou com mais publicações de autores estadunidenses foi 2009, ano em que estiveram envolvidos em 33 dos 74 artigos (44,6%) publicados.

Na Fig. 6 exhibe-se a rede de colaboração científica mundial de acordo com os países das instituições de afiliação dos autores. Para a concepção do gráfico em questão, foram considerados apenas aqueles países que apresentam um mínimo de 3 publicações, o que constitui uma amostra de 31 países.

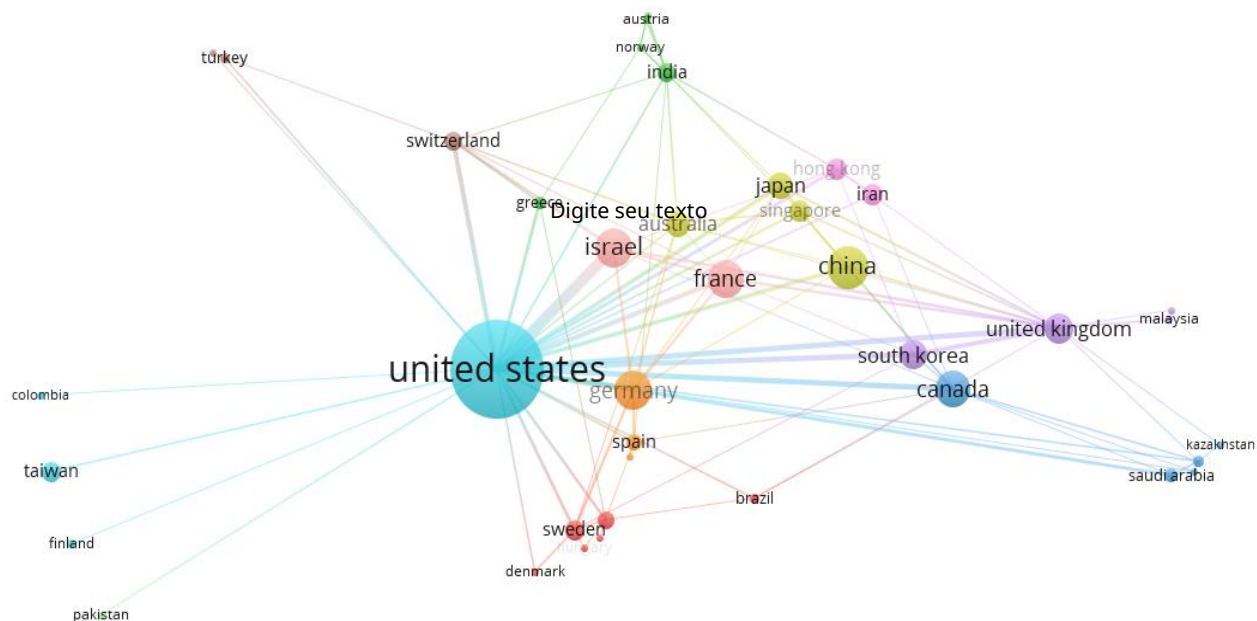


Fig. 6. Rede de colaboração científica mundial entre países no período de 1972 a 2019.

Na visualização de redes, os elementos (nós) são representados por seu rótulo e, por padrão, também por um círculo. O tamanho do rótulo e do círculo de um nó são determinados pelo peso (influência) do nó na rede. Quanto maior o peso de um nó, maior o rótulo e o círculo. Para alguns nós, o rótulo pode não ser exibido. Isso ocorre para evitar rótulos sobrepostos. A cor de um nó é determinada pelo *cluster* ao qual ele pertence. As linhas entre os nós representam as ligações (*links*) entre eles [27].

No intuito de identificar redes de colaboração de países específicos, na Fig. 7 evidencia-se a rede de colaboração científica dos Estados Unidos que, conforme já foi mencionado, representa o principal país na realização de pesquisas sobre canais de difusão. Os critérios para a concepção do gráfico permanecem os mesmos (mínimo de 3 publicações para o país).

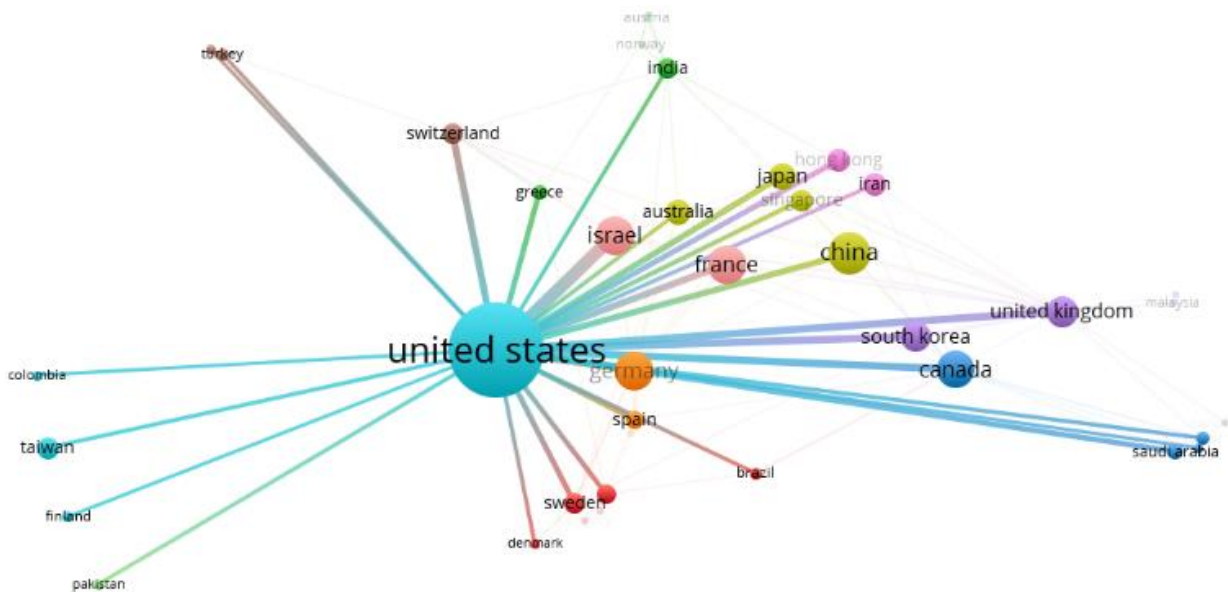


Fig. 7. Rede de colaboração científica dos Estados Unidos no período de 1972 a 2019.

Com base na análise da Fig. 7, é evidente que os Estados Unidos contam com uma rede de colaboração bem ampla e conectada com países de vários continentes.

Em seguida, foram selecionados os principais autores sobre o tema, levando em consideração apenas a quantidade de publicações e desconsiderando quaisquer indicadores

adicionais (citações, autocitações, fator de impacto e índice-h da fonte etc.). Sendo assim, os principais autores são apresentados na Tabela 1.

TABELA 1
PRINCIPAIS AUTORES NO PERÍODO DE 1972 A 2019

Autor(es)	Quantidade de publicações
S. Shamai	38
C. Nair	19
A. J. Goldsmith, N. Jindal	18
Y. Liang, H. V. Poor	17
H. Boche	16
J. M. Cioffi	14
Y. Steinberg	13
R. Dabora, D. Gesbert, W. Utschick	12
G. Caire, A. K. Khandani, G. Kramer, T. J. Oechtering, S. Ulukus, S. Yang	11
B. Hassibi, M. Joham, M. Kobayashi, S. Vishwanath, C. C. Wang	10
T. N. Davidson, Y. Geng, Y. C. Liang, R. F. Schaefer, M. Skoglund, D. Slock, R. F. Wyrembelski	9
M. R. Aref, L. Georgiadis, R. Liu, A. Nosratinia, P. Piantanida	8

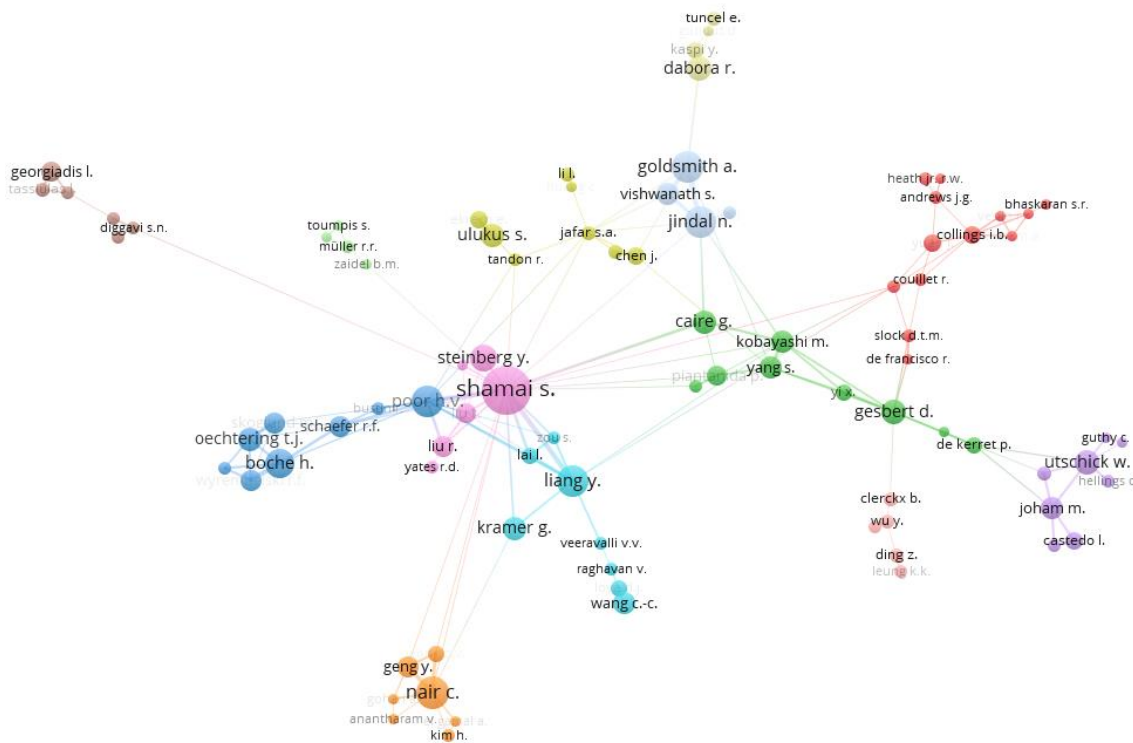


Fig. 8. Rede de colaboração científica mundial entre autores no período de 1972 a 2019.

Inicialmente, é fundamental explicar que nos gráficos de rede destacam-se as ligações de coautoria nos documentos selecionados nas buscas em bases de dados. Por este motivo, Cover, que é responsável por alguns dos trabalhos precursores em canais de difusão, não possui nenhum nó no gráfico da Fig. 8, apesar de atender aos critérios definidos, já que as buscas retornaram 3 publicações que, juntas, totalizavam mais de 1300 citações. Isto se deve ao fato de que Cover é o único autor destes artigos e, portanto, não há como ter um nó sem ligações na rede, visto que não há colaboração nessas publicações.

Não obstante os Estados Unidos representarem, digamos, uma potência em pesquisas sobre canais de difusão, na Tabela 1 destaca-se que o israelense Shlomo Shamai constitui o principal autor sobre o assunto, sendo responsável por 38

publicações. Antes de discutir sobre a quantidade de publicações dos principais autores sobre canais de difusão, é importante ter uma ideia acerca da rede de colaboração científica entre tais autores, para identificar seus *clusters*, e de que forma eles impactam no desenvolvimento de publicações sobre o tema.

Sendo assim, na Fig. 8 evidencia-se a rede de colaboração científica mundial entre autores. Para a construção do gráfico em questão, foram considerados apenas aqueles que apresentam um mínimo de 3 publicações e 10 citações, estabelecendo-se assim, uma amostra de 167 autores.

Shamai é professor do Departamento de Engenharia Elétrica da *Technion – Israel Institute of Technology* e suas pesquisas englobam um amplo espectro de tópicos em Teoria da Informação e Comunicação Estatística. Além disso, já foi condecorado com diversas honrarias, como a *Claude E. Shannon Award* de 2011 (entregue pelo *IEEE ITSOC*) e a *IEEE Richard W. Hamming Medal* de 2017.

Shamai publica em cooperação com outros autores e, dessa forma, a fim de proporcionar uma representação do *cluster* de pesquisas deste autor, na Fig. 9 exhibe-se a rede de colaboração científica de Shamai. Os critérios para a criação do gráfico permanecem os mesmos (mínimo de 3 publicações e 10 citações para o autor).

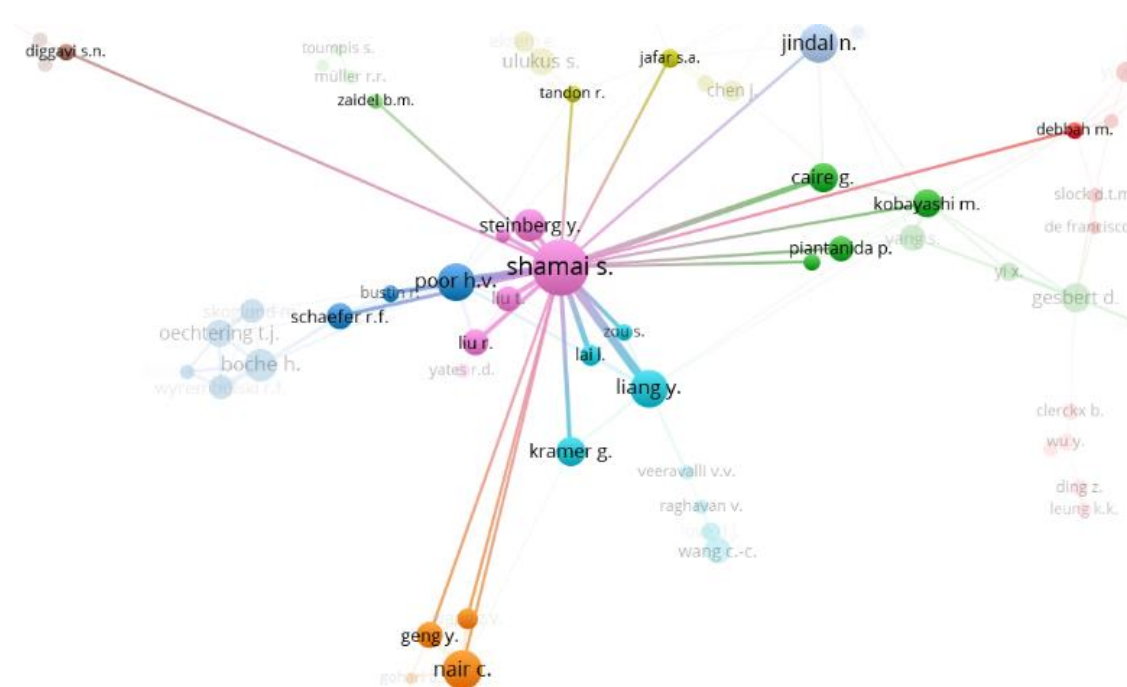


Fig. 9. Rede de colaboração científica de Shamai no período de 1997 a 2016⁵.

Por meio de uma análise da Fig. 9, é perceptível que Shamai dispõe de uma ampla rede de colaboração para o desenvolvimento de pesquisas em canais de difusão. Com relação aos principais coautores e suas respectivas quantidades de publicações, é possível mencionar: Yingbin Liang – *The Ohio State University* (10), Harold Vincent Poor – *Princeton University* (9) e Giuseppe Caire – *Technical University of Berlin* (6). A rede de colaboração de Shamai envolve grande

parte dos *clusters* mundiais de pesquisas sobre o assunto, que foram apresentados na Fig. 8.

Com o intuito de complementar a análise das redes de colaboração dos principais autores sobre canais de difusão, na Fig. 10 destaca-se a rede de colaboração científica de Chandra Nair, o vice-líder do *ranking* de autores. Os critérios para a concepção do gráfico permanecem os mesmos (mínimo de 3 publicações e 10 citações para o autor).

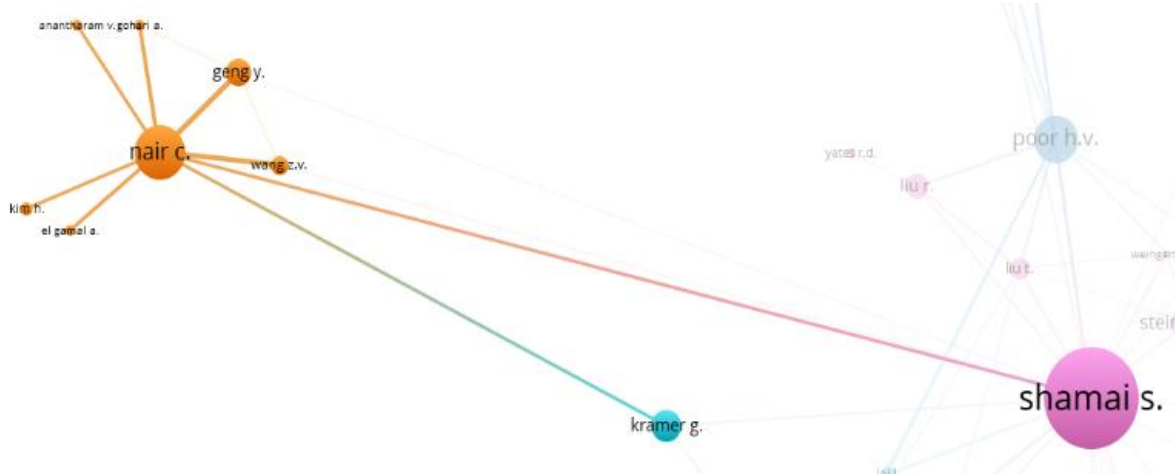


Fig. 10. Rede de colaboração científica de Nair no período de 2007 a 2017⁶.

O autor indiano Chandra Nair, membro da *Chinese University of Hong Kong*, é o segundo autor mais participativo em publicações, apesar de ser responsável por uma quantidade de publicações 50% menor (metade) que Shamai, com 19 artigos. No entanto, ele está presente em todos os 17 artigos da *Chinese University of Hong Kong* sobre canais de difusão (nos outros artigos, Nair publicou como membro da *Microsoft*

Research), sendo, diga-se, o grande responsável por esta instituição ocupar a 10ª posição no *ranking* de produtividade sobre o assunto. Por outro lado, é fundamental ressaltar a colaboração de Yanlin Geng, que também é membro da *Chinese University of Hong Kong* e é coautor em 8 dos 19 artigos (42%) de Chandra Nair.

Além disso, na Fig. 10 mostra-se que Nair e Shamai já foram

⁵ Anos das publicações mais antiga e mais recente do autor, respectivamente.

⁶ Anos das publicações mais antiga e mais recente do autor, respectivamente.

parceiros em artigos. Os pesquisadores trabalharam juntos no artigo “*On broadcast channels with binary inputs and symmetric outputs*”, que possui uma versão publicada no congresso *IEEE International Symposium on Information Theory* de 2010 e outra versão publicada no periódico *IEEE Transactions on Information Theory* em 2013, contabilizando assim, 2 publicações em comum, apesar de ser basicamente o mesmo estudo.

Com relação aos objetivos de pesquisa de Chandra Nair, é possível afirmar que grande parte de seus artigos são direcionados à investigação de diferentes casos de estudo em canais de difusão degradados (gaussiano, mais capaz, menos ruidoso, entre outros) e à análise dos limites internos e externos da região de capacidade, com um grande enfoque para o limite interno de Marton⁷ (objeto principal de pesquisa em 4 de seus 19 artigos).

Após tratar da frequência de publicações, publicações por país, publicações por autor, redes de colaboração científica (países e autores), áreas do conhecimento e fontes de divulgação das publicações, resta apenas a identificação dos artigos mais citados sobre canais de difusão. A identificação de tais trabalhos, representa uma atividade relevante, visto que

pode corroborar o entendimento de aspectos determinantes, e muitas vezes inovadores, acerca dessa linha de pesquisa em canais de difusão.

No entanto, se faz necessário um breve entendimento das circunstâncias que envolvem a geração de citações, tendo em vista que este é um fenômeno de grande interesse da área de conhecimento Ciência da Informação.

As citações, graças às suas propriedades restritivas e facilitadoras, constituem o motor do processo de estruturação do conhecimento científico, garantindo a expansão das comunidades científicas. Os estudos de citações desempenham um papel importante nas áreas da Biblioteconomia e Ciência da Informação. No entanto, a Sociologia da Ciência e o entendimento de suas “métricas” constituem objetos de interesse para quaisquer pesquisadores [29]. Nessas circunstâncias, a análise de citações constitui um dos elementos fundamentais nos estudos quantitativos da ciência [30].

Sendo assim, na Tabela 2 são apresentados os artigos mais citados sobre canais de difusão, limitando-se a exibição, apenas, de artigos com mais de 300 citações.

TABELA 2
ARTIGOS MAIS CITADOS (COM MAIS DE 300 CITAÇÕES)

Artigo	Citações
I. Csiszár, and J. Körner, “Broadcast channels with confidential messages,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 24, no. 3, pp. 339-348, 1978 [31].	2239
G. Caire, and S. Shamai, “On the achievable throughput of a multiantenna gaussian broadcast channel,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 49, no. 7, pp. 1691-1706, 2003 [32].	1723
H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai, “The capacity region of the gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 52, no. 9, pp. 3936-3964, 2006 [33].	1052
T. M. Cover, “Broadcast channels,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 18, no. 1, pp. 2-14, 1972 [13].	1020
P. Viswanath, and D. N. C. Tse, “Sum capacity of the vector gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 49, no. 8, pp. 1912-1921, 2003 [34].	887
J. I. Capetanakis, “Tree algorithms for packet broadcast channels,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 25, no. 5, pp. 505-515, 1979 [35].	634
W. Yu, and J. M. Cioffi, “Sum capacity of gaussian vector broadcast channels,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 50, no. 9, pp. 1875-1892, 2004 [36].	530
N. Jindal, W. Rhee, S. Vishwanath, S. A. Jafar, and A. J. Goldsmith, “Sum power iterative water-filling for multi-antenna gaussian broadcast channels,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 51, no. 4, pp. 1570-1580, 2005 [37].	440
D. N. Tse, “Optimal power allocation over parallel gaussian broadcast channels,” in <i>Proc. 6th IEEE International Symposium on Information Theory</i> , Ulm, Germany, 1997 [38].	344
L. Li, and A. J. Goldsmith, “Capacity and optimal resource allocation for fading broadcast channels. I. Ergodic capacity,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 47, no. 3, pp. 1083-1102, 2001 [39].	334
S. Wagner, R. Couillet, M. Debbah, and D. T. M. Slock, “Large system analysis of linear precoding in correlated MISO broadcast channels under limited feedback,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 58, no. 7, pp. 4509-4537, 2012 [40].	325
P. P. Bergmans, “Random coding theorem for broadcast channels with degraded components,” <i>IEEE Transactions on Information Theory</i> , vol. 19, no. 2, pp. 197-207, 1973 [41].	306

Dentre os artigos listados na Tabela 2, é importante mencionar que o artigo seminal de Cover [13], que introduziu o conceito de canais de difusão, não é o mais citado, o que não minimiza o seu impacto ou sua importância, visto que ele foi responsável por todo o desenvolvimento de pesquisas nessa

área. Shamai é coautor em 2 dos 3 artigos mais citados, sendo que 33 de seus 38 artigos (87%) foram publicados no século XXI, o que restringe o espaço de tempo para a geração de citações, visto que 5 dos 12 artigos (41%) apresentados na Tabela 2 foram publicados no século XX.

⁷ Esse limite interno para a região de capacidade foi proposto pela húngara Katalin Marton em 1979 [28].

O artigo mais citado foi publicado em 1978 pelos húngaros Imre Csiszár e János Körner que, na época, eram membros do *Mathematical Institute of the Hungarian Academy of Sciences*. Ambos os autores foram condecorados com a *Claude E. Shannon Award*, sendo Csiszár em 1996 e Körner em 2014. No artigo em questão, há resultados sobre a transmissão simultânea de mensagens para uso comum e transmissão de mensagens confidenciais. Para este modelo, eles caracterizam as taxas alcançáveis em termos de quantidades de informação, de modo que a região de taxas é, a princípio, computável⁸ [31].

Em [31] são tratadas questões relacionadas à confidencialidade de mensagens em sistemas de comunicação e apresentaram resultados e implicações matemáticas para este problema. Esse fato constitui um ponto importante que permitiu a continuidade no desenvolvimento de pesquisas sobre o assunto, tendo em vista que questões relacionadas à confidencialidade e segurança da informação passaram a se constituir como preocupações recorrentes tanto para a implementação quanto para a utilização de recursos tecnológicos.

IV. PROBLEMAS ABERTOS EM CANAIS DE DIFUSÃO

Na sequência, são expostos alguns problemas que ainda não foram resolvidos pela comunidade acadêmica. Isso acaba por completar as análises feitas em parágrafos anteriores, pois indicam focos promissores de pesquisa em canais de difusão. Vale mencionar, que tais problemas foram certificados pelo Prof. Dr. Chandra Nair da *Chinese University of Hong Kong* que, conforme foi mostrado na análise bibliométrica, representa um dos principais autores sobre o tema⁹.

Grupo 1. Canais de difusão de 2 receptores

Grupo 1.1. Canais de difusão discretos sem memória de 2 receptores (sem estado/feedback)

Problema Aberto 1. A região de capacidade do canal de difusão discreto sem memória (*discrete memoryless broadcast channel*) geral de 2 receptores é desconhecida [44].

Problema Aberto 2. Mesmo no caso em que não há mensagem comum ($R_0 = 0$), a região de capacidade do canal de difusão geral é desconhecida [45].

Problema Aberto 3. Qual é a capacidade de soma do canal de difusão binário de distorção simétrica (*binary skew-symmetric broadcast channel*)? [15].

Problema Aberto 4. O limite interno de Marton é estreito em geral? [15].

Grupo 1.2. Canais de difusão discretos sem memória de 2 receptores (estado/feedback)

Problema Aberto 5. Qual é a capacidade de mensagem

comum do canal de difusão discreto sem memória com estado discreto sem memória quando a informação de estado está disponível não causalmente no codificador? [15].

Problema Aberto 6. Qual é a capacidade de soma do canal de difusão gaussiano (*gaussian broadcast channel*) simétrico de 2 receptores com *feedback*? [15].

Problema Aberto 7. Qual é a região de capacidade de *feedback* do canal de difusão com ruído branco aditivo e gaussiano (*additive white gaussian noise*)? (Por que o *feedback* aumenta a capacidade neste caso?) [46].

Problema Aberto 8. Qual é a região de capacidade ergódica do canal de difusão com desvanecimento gaussiano (*gaussian fading broadcast channel*) rápido quando a informação de ganho do canal está disponível somente nos decodificadores? [15].

Problema Aberto 9. A região de capacidade do canal de difusão com desvanecimento gaussiano com estado de canal conhecido nos receptores, mas desconhecido no emissor, permanece não resolvida [47].

Grupo 2. Canais de difusão discretos sem memória de 3 ou mais receptores (sem estado/feedback)

Problema Aberto 10. Qual é a região de capacidade do canal de difusão menos ruidoso (*less noisy broadcast channel*) com 4 ou mais receptores? [15].

Problema Aberto 11. Qual é a região de capacidade do canal de difusão mais capaz (*more capable broadcast channel*) com 3 ou mais receptores? [15].

Problema Aberto 12. Qual é a região de capacidade do canal de difusão discreto sem memória geral de 3 receptores com uma mensagem comum destinada a todos os 3 receptores e uma mensagem privada destinada a 1 receptor? [15].

Problema Aberto 13. Qual é a região de capacidade do canal de difusão de produto gaussiano (*gaussian product broadcast channel*) com mais de 2 receptores? [15].

Problema Aberto 14. Simples caracterização espectral do canal de difusão gaussiano para mais de 2 receptores [46].

V. CONCLUSÕES

Diante das informações, indicadores e problemas abertos expostos no presente trabalho, foi constatado que o início das pesquisas sobre canais de difusão ocorreu em 1972, com a publicação do artigo seminal de Cover, sendo que esta foi a única publicação sobre o tema no ano em questão. O interesse nas investigações sobre este modelo de comunicação cresceu com o passar do tempo, e foram verificadas pequenas variações na quantidade de publicações, mas nada que possa ser caracterizado como uma estagnação ou desinteresse por parte dos pesquisadores da área. O fato de o problema geral ainda estar aberto, pode ser compreendido como um fator determinante para motivar a produção científica nos anos que

⁸ O termo *computável* refere-se, grosso modo, à existência de algoritmo. Uma discussão sobre o conceito de computabilidade pode ser encontrada, por exemplo, em [42], [43].

⁹ Um e-mail foi enviado ao Prof. Dr. Chandra Nair perguntando sobre a veracidade de alguns problemas abertos. Ele prontamente nos respondeu, não somente confirmando a maioria de nossas perguntas, mas também gentilmente tecendo comentários valiosos sobre os problemas abertos.

se seguem.

É possível estimar que a oscilação entre o número de publicações em diferentes anos pode estar associada ao desenvolvimento tecnológico. O enlace de descida (*downlink*) é moderno, ou seja, não existia na época do artigo precursor de Cover. Além disso, o primeiro sistema de telefonia celular foi instalado nos Estados Unidos, no ano de 1977 pela *AT&T Bell Laboratories* [48], e a era da Internet Comercial teve início em 1995, com o primeiro *boom* de usuários ocorrendo entre os anos de 1995 e 2000 [49]. Isso, de certa forma, indica a força dos desenvolvimentos matemáticos, nem sempre atrelados diretamente a um problema tecnológico a ser resolvido. Nesse caso, a matemática associada ao problema *broadcast channel* surgiu antes do enlace de descida, conhecido como *downlink*.

No que diz respeito ao cenário da produção científica por países, Estados Unidos, China e Israel concentram o maior número de participações em publicações. No que se refere aos autores, o israelense Shlomo Shamai (membro da instituição *Technion – Israel Institute of Technology*) constitui o principal autor sobre o assunto, já que é responsável por 38 publicações, sendo que seu primeiro artigo sobre *broadcast* foi publicado no ano de 1997.

Com relação aos trabalhos precursores, baseando-se apenas por citações, foi observado que Shamai está presente em 2 dos 3 artigos mais citados, no entanto, o artigo líder neste quesito foi publicado em 1978 por Imre Csiszár e János Körner. O artigo seminal de Cover, que inaugura o conceito de *broadcast channels* é apenas o 4º artigo mais citado, mas isso não minimiza sua importância, visto que seus resultados foram determinantes para a estruturação e o desenvolvimento futuro de basicamente todas as pesquisas que abordam este modelo de comunicação.

Desse modo, o presente artigo apresentou uma caracterização acerca do cenário mundial de pesquisas em canais de difusão, evidenciando diversos indicadores e informações que podem ser de grande valor para pesquisadores na continuidade de estudos sobre canais de difusão. No entanto, não foi promovida nenhuma diferenciação no que diz respeito às diversas abordagens teóricas voltadas à pesquisa sobre canais de difusão tratadas na literatura, apenas manteve-se o norte de um cenário geral.

Como sugestão para trabalhos futuros, é possível destacar a realização de pesquisas direcionadas ao mapeamento científico dos casos de estudo específicos, casos particulares, que se encontram disponíveis na literatura, a fim de propiciar uma caracterização mais aprofundada do estado da arte sobre *broadcast channels*.

Por fim, é importante mencionar que a identificação de casos práticos que corroborem com o ideal da relevância de pesquisas em canais de difusão também pode ser de grande valor, uma vez que é importante conhecer as possíveis implicações tecnológicas originadas a partir da solução de problemas em Teoria da Informação relacionados à região de capacidade do canal de difusão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à colaboração do Prof. Dr. Chandra

Nair do Departamento de Engenharia da Informação da *Chinese University of Hong Kong* por ter retornado nosso contato via e-mail no dia 22 de março de 2019, disponibilizando comentários, sugestões e esclarecendo que os problemas listados ainda constavam como problemas abertos.

REFERÊNCIAS

- [1] N. Wiener, "Time, communication, and the nervous system," *Annals of the New York Academy of Sciences*, vol. 50, no. 4, pp. 197-220, 1948.
- [2] E. von Glasersfeld, "Wiener's insight into communication," *Kybernetes*, vol. 23, no. 6-7, pp. 21-22, 1994.
- [3] N. Wiener, *Cybernetics: or control and communication in the animal and the machine* (2nd ed.). Cambridge, MA: The MIT Press, 1965.
- [4] R. V. L. Hartley, "Transmission of information," *Bell System Technical Journal*, vol. 7, no. 3, pp. 535-563, 1928.
- [5] C. Wang, and H. W. Shen, "Information theory in scientific visualization," *Entropy*, vol. 13, no. 12, pp. 254-273, 2011.
- [6] C. E. Shannon, "A mathematical theory of communication," *Bell System Technical Journal*, vol. 27, pp. 379-423 (July), pp. 623-656 (October), 1948.
- [7] F. M. Reza, *An introduction to information theory*. New York, NY: McGraw-Hill Book Company, 1961.
- [8] R. M. Losee, "Information theory for information science: antecedents, philosophy, and applications," *Education for Information*, vol. 33, no. 1, pp. 23-35, 2017.
- [9] S. M. Moser, and P. N. Chen, *A student's guide to coding and information theory*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2012.
- [10] T. M. Cover, and J. A. Thomas, *Elements of information theory* (2nd ed.). Hoboken, NJ: Wiley-Interscience, 2006.
- [11] A. Dembo, T. M. Cover, and J. A. Thomas, "Information theoretic inequalities," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 37, no. 6, pp. 1501-1518, 1991.
- [12] R. B. Ash, *Information theory*. New York, NY: Interscience, 1965.
- [13] T. M. Cover, "Broadcast channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 2-14, 1972.
- [14] T. M. Cover, "Comments on broadcast channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 44, no. 6, pp. 2524-2530, 1998.
- [15] A. El Gamal, and Y. H. Kim, *Network information theory*. New York, NY: Cambridge University Press, 2011.
- [16] C. Nair, H. Kim, and A. El Gamal, "On the optimality of randomized time division and superposition coding for the broadcast channel," in *Proc. 11th IEEE Information Theory Workshop*, Cambridge, UK, 2016.
- [17] B. Hassibi, and M. Sharif, "Fundamental limits in MIMO broadcast channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 7, pp. 1333-1344, 2007.
- [18] T. M. Cover, "Some advances in broadcast channels," In: A. J. Viterbi (Ed.), *Advances in communication systems*, Volume 4, pp. 229-260. New York, NY: Academic Press, 1975.
- [19] C. Nair, "Capacity regions of two new classes of two-receiver broadcast channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 56, no. 9, pp. 4207-4214, 2010.
- [20] M. C. Sánchez-Gómez, M. V. Martín-Cilleros, A. P. Costa, and F. J. P. Peñalvo, "Posicionamiento de la investigación en ciencias sociales," *RISTI - Revista Ibérica de Sistemas e Tecnologías de Informação*, vol. 2018, no. 28, pp. 102-113, 2018.
- [21] H. Yao *et al.*, "Bibliometric analysis of research on the role of intestinal microbiota in obesity," *PeerJ*, vol. 2018, no. 6, pp. 1-20, 2018.
- [22] A. Menéndez-Manjón, K. Moldenhauer, P. Wagener, and S. Barcikowski, "Nano-energy research trends: bibliometrical analysis of nanotechnology research in the energy sector," *Journal of Nanoparticle Research*, vol. 13, no. 9, pp. 3911-3922, 2011.
- [23] P. B. Soares, T. C. J. Carneiro, J. L. Calmon, and L. O. C. O. Castro, "Análise bibliométrica da produção científica brasileira sobre tecnologia de construção e edificações na base de dados Web of Science," *Ambiente Construído*, vol. 16, no. 1, pp. 175-185, 2016.
- [24] H. N. Su, and P. C. Lee, "Mapping knowledge structure by keyword co-occurrence: a first look at journal papers in technology foresight," *Scientometrics*, vol. 85, no. 1, pp. 65-79, 2010.
- [25] Y. Ding, G. G. Chowdhury, and S. Foo, "Bibliometric cartography of information retrieval research by using co-word analysis," *Information Processing and Management*, vol. 37, no. 6, pp. 817-842, 2001.
- [26] M. Wang, and L. Chai, "Three new bibliometric indicators/approaches

- derived from keyword analysis,” *Scientometrics*, vol. 116, no. 2, pp. 721-750, 2018.
- [27] N. J. van Eck, and L. Waltman, *VOSviewer manual* [Online]. 2019. Available: <http://www.vosviewer.com/download/f-13s2.pdf>
- [28] K. Marton, “A coding theorem for the discrete memoryless broadcast channel,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 25, no. 3, pp. 306-311, 1979.
- [29] E. Riviera, “Scientific communities as autopoietic systems: the reproductive function of citations,” *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, vol. 64, no. 7, pp. 1442-1453, 2013.
- [30] A. F. J. van Raan, “In matters of quantitative studies of science the fault of theorists is offering too little and asking too much,” *Scientometrics*, vol. 43, no. 1, pp. 129-139, 1998.
- [31] I. Csiszár, and J. Körner, “Broadcast channels with confidential messages,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 24, no. 3, pp. 339-348, 1978.
- [32] G. Caire, and S. Shamai, “On the achievable throughput of a multiantenna gaussian broadcast channel,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 7, pp. 1691-1706, 2003.
- [33] H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai, “The capacity region of the gaussian multiple-input multiple-output broadcast channel,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 9, pp. 3936-3964, 2006.
- [34] P. Viswanath, and D. N. C. Tse, “Sum capacity of the vector gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, no. 8, pp. 1912-1921, 2003.
- [35] J. I. Capetanakis, “Tree algorithms for packet broadcast channels,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 505-515, 1979.
- [36] W. Yu, and J. M. Cioffi, “Sum capacity of gaussian vector broadcast channels,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 9, pp. 1875-1892, 2004.
- [37] N. Jindal, W. Rhee, S. Vishwanath, S. A. Jafar, and A. J. Goldsmith, “Sum power iterative water-filling for multi-antenna gaussian broadcast channels,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 51, no. 4, pp. 1570-1580, 2005.
- [38] D. N. Tse, “Optimal power allocation over parallel gaussian broadcast channels,” in *Proc. 6th IEEE International Symposium on Information Theory*, Ulm, Germany, 1997.
- [39] L. Li, and A. J. Goldsmith, “Capacity and optimal resource allocation for fading broadcast channels. I. Ergodic capacity,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 47, no. 3, pp. 1083-1102, 2001.
- [40] S. Wagner, R. Couillet, M. Debbah, and D. T. M. Slock, “Large system analysis of linear precoding in correlated MISO broadcast channels under limited feedback,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 7, pp. 4509-4537, 2012.
- [41] P. P. Bergmans, “Random coding theorem for broadcast channels with degraded components,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 19, no. 2, pp. 197-207, 1973.
- [42] M. R. Garey, and D. S. Johnson, *Computers and intractability: a guide to the theory of NP-completeness*. New York, NY: W. H. Freeman & Co., 1990.
- [43] N. J. Cutland, *Computability: an introduction to recursive function theory*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1980.
- [44] Y. Geng, C. Nair, S. Shamai, and Z. V. Wang, “On broadcast channels with binary inputs and symmetric outputs,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 59, no. 11, pp. 6980-6989, 2013.
- [45] R. D. Yates, and D. Tse, “K user fading broadcast channels with CSI at the receivers,” in *Proc. 5th IEEE Information Theory and Applications Workshop*, La Jolla, USA, 2011.
- [46] A. El Gamal, and Y. H. Kim, *Lecture notes on network information theory* [Online]. 2010. Available: <http://arxiv.org/abs/1001.3404v4>
- [47] D. N. C. Tse, and R. D. Yates, “Fading broadcast channels with state information at the receivers,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 58, no. 6, pp. 3453-3471, 2012.
- [48] H. Lacochee, N. Wakeford, and I. Pearson, “A social history of the mobile telephone with a view of its future,” *BT Technology Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 203-211, 2003.
- [49] J. Naughton, “The evolution of the internet: from military experiment to general purpose technology,” *Journal of Cyber Policy*, vol. 1, no. 1, pp. 5-28, 2016.