

Análises comparativas entre diferentes técnicas de indexação para dados esparsos no sistema SAVIME

Gabriel T. Vale, Anderson Silva, Fábio Porto

¹Laboratório Nacional de Computação Científica (LNCC), DEXL LAB (LNCC)
Caixa Postal 95.113 – 25.651-070 – Rio de Janeiro– RJ – Brasil

{gabrielv, anderson, fporto}@lncc.br

Resumo. *Com o avanço da tecnologia, a quantidade de dados gerados por segundo tem aumentado drasticamente. Neste contexto, torna-se necessário o uso de novas estratégias de armazenamento e análise, visando obter melhor eficiência e desempenho computacional. Diante disso, este trabalho efetua um estudo comparativo do uso de diferentes técnicas de estruturação e armazenamento de dados pluviométricos da região do Rio de Janeiro, utilizando o índice PH-tree e o banco de dados SAVIME, um SGBD Não Relacional que implementa um modelo baseado em arrays multidimensionais. Os resultados obtidos demonstram que diferentes formas de estruturação dos dados interferem diretamente no desempenho da aplicação.*

Abstract. *With the advancement of technology, the amount of data generated per second has increased dramatically. In this context, it is necessary to use new storage and analysis strategies, aiming to obtain better efficiency and computational performance. Therefore, this work makes a comparative study of the use of different Techniques for structuring and storing rainfall data in the region of Rio de Janeiro, using the Ph-tree index and the SAVIME database, a Non-Relational DBMS that implements a model of database based on multidimensional arrays. The results indicate that SAVIME is an effective system to deal with large volumes of multidimensional data. The results obtained show that different ways of structuring the data directly interfere in the performance application*

1. Introdução

Com o passar dos anos, a quantidade de dados gerados ao redor do mundo tem aumentado em escala nunca antes vista. Trabalhos anteriores tem demonstrado o potencial do uso de bancos de dados que implementam modelos de *arrays* (matrizes multidimensionais) ao lidar com dados de múltiplas dimensões. Dentre as diferentes implementações, o sistema SAVIME [da Silva et al. 2020] destaca-se pela implementação do modelo TARS(Typed Array Schema) [Lustosa et al. 2017], o qual proporciona mecanismos eficientes de inserção, estruturação e consultas de dados, sem necessidade de conversões custosas para o formato específico do sistema.

Embora a escolha do modelo de dados baseado em *arrays* afete diretamente o desempenho da aplicação desenvolvida, a estruturação dos dados no sistema é altamente relevante para um desempenho adequado. Diferentes bancos de dados oferecem diferentes estruturas de armazenamento com base na densidade e distribuição dos dados ao

longo do espaço, bem como mecanismos de acesso que consideram características particulares de diferentes sistemas de coordenadas. Assim, o objetivo deste trabalho é o de demonstrar de que forma essas diferentes disposições e organizações dos dados no sistema podem interferir no desempenho da aplicação.

No trabalho de [Herrera et al. 2021] foi realizado um estudo que demonstrou o desempenho do SAVIME em comparação ao de uma estrutura de indexação, a Ph-tree [Zäschke et al. 2014] em um conjunto de dados baseado em informações climáticas referentes à América do Sul, distribuídos de modo não homogêneo ao longo do espaço. Para o experimento, foi utilizado no SAVIME o sistema de especificação de dimensões totais, no qual apenas os dados das posições não nulas são representados em memória. O trabalho atual busca dar continuidade ao estudo realizado investigando outras formas de representação. Os resultados indicaram que os melhores resultados podem ser obtidos ao ser utilizado o mecanismo de indexação da Ph-tree, bem como uma estruturação densa de dados e um sistema de coordenadas homogêneo.

O restante do artigo está estruturado da seguinte forma. A Seção 2 descreve o contexto da Pesquisa, os conceitos básicos do modelo baseado em *arrays* utilizado e a estruturação de indexação Ph-tree. Na Seção 3 são descritos os experimentos comparativos bem como os resultados obtidos. Por fim, a Seção 4 apresenta as considerações finais sobre o estudo bem como propostas de trabalhos futuros.

2. Contexto da Pesquisa

2.1. O sistema SAVIME

Modelos de dados baseados em *arrays* são adequados para representação de dados de natureza multidimensional, muito comuns em aplicações que envolvem sistemas de coordenadas (e.g. astronomia, física ou meteorologia). Chama-se de *array*, ou matriz multidimensional, uma estrutura regular formada por um conjunto de dimensões, na qual um conjunto de índices identifica uma célula ou tupla que contém valores para um conjunto de atributos.

Um TAR schema representa um conjunto de Typed Arrays (TARs), os quais definem a estrutura básica de armazenamento de dados, sendo constituídos por um conjunto de elementos de dados, os quais podem ser **dimensões** ou **atributos**. Assume-se que dimensões são conjuntos ordenados de dados que definem em conjunto um sistema de coordenadas sobre os quais é possível realizar consultas sobre os dados (ex. Latitude e Longitude para dados geográficos), enquanto atributos definem os tipos e a cardinalidade dos dados armazenados nas células (valores como brilho ou temperatura em uma determinada região). O modelo define ainda o conceito de **subtars**, os quais são subdivisões de um mesmo TAR em regiões distintas do espaço.

Para representação de dados de natureza densa ou esparsa, o SAVIME permite que sejam definidas 3 tipos de especificações de dimensões, as quais permitem que a especificação do *layout* de dados para os *arrays*. O primeiro tipo refere-se a **especificação de dimensão ordenada**. Neste caso, um conjunto de dados é associado ao subTAR conforme um intervalo especificado, de forma ordenada. Este tipo de especificação possui melhor adequação para dados densos. Outro tipo de especificação suportado é denominado **especificação de dimensão parcial**. Este formato é adequado para dados esparsos

segundo um subconjunto dos valores de dimensões, mas que permanece coerente com relação às demais. Por último, o sistema oferece o formato de **especificação de dimensão total**, o qual é adequado para dados esparsos, nos quais todos os índices de todas as dimensões precisam ser armazenados explicitamente.

Além disso para a definição dos índices de dimensão, o SAVIME suporta índices implícitos em que os limites do *array* são definidos pelo usuário e explícitos onde os limites são definidos pelo *dataset* carregado previamente no sistema.

2.2. A PH-tree como estrutura de indexação associada ao SAVIME

O trabalho de [Herrera et al. 2021] teve como objetivo explorar uma alternativa para alocação e indexação de dados esparsos no SAVIME, considerando a estrutura de indexação PH-tree. A PH-tree propõe-se como uma alternativa para armazenamento de dados multidimensionais de natureza hierárquica, projetada para armazenamento de grandes conjuntos de dados, fornecendo uma série de recursos para otimização de desempenho computacional tanto em termos de tempo como de memória. Em [Zäschke et al. 2014], o funcionamento da árvore é descrito, sendo a mesma proposta como uma ferramenta adequada como estrutura de indexação para bancos de dados.

Diante disto, o estudo citado teve como objetivo avaliar a eficiência da estrutura para indexação de dados esparsos, em comparação com a representação dos mesmos no SAVIME utilizando especificações totais para representação de dados gerados a partir de simulação numérica fornecidos pelo *Consortium for Small-Scale Modeling* (COSMO). Os dados obtidos são esparsos, não estando distribuídos neste caso de forma geograficamente homogênea em um sistema de coordenadas geo-referenciado baseado em latitude/longitude. Uma vez que o *array* resultante apresenta muitos pares de coordenadas aos quais nenhum dado é associado, o experimento analisou apenas o desempenho da especificação de dimensão total no SAVIME.

3. Experimentos e Resultados

Este trabalho tem como objetivo dar continuidade aos experimentos realizados no trabalho de [Herrera et al. 2021], explorando a estruturação de dados utilizando dimensões ordenadas, originalmente projetados para armazenamento de dados densos, utilizando tanto indexação explícita quanto implícita. Para isto, foram usados os mesmos dados do estudo inicial. O *dataset* COSMO utilizado define dados de observação pluviométrica abrangendo uma janela espacial sobre a região da América do Sul, sobre os valores de latitude e longitude (-59.45, -90.28) a (14.9, -20.5) em um intervalo de 72 horas. O produto final resulta em um total de 47.497.002 observações e 3.84GB de informações como pressão, direção do vento e precipitação ao longo de 1437 pares de coordenadas. O experimento foi realizado em uma máquina com as seguintes configurações: Intel(R) Core(TM) i7-4790 CPU @ 3.60 GHz x 8 2.71 GHz, 16 GB de RAM. Apenas o atributo referente a precipitação foi utilizado durante os experimentos. Os códigos utilizados neste experimento estão disponíveis para acesso ¹.

A proposta do estudo atual consistiu em comparar os resultados obtidos no trabalho de [Herrera et al. 2021], o qual fez uso de especificações de dimensão totais e

¹<https://github.com/GabrielTavaresVale/EXPERIMENTO-02>

explícitas no SAVIME, com o desempenho a ser obtido utilizando especificações ordenadas, tanto implícitas quanto explícitas. Para isto, foram reproduzidos os resultados do artigo mencionado, averiguando que os mesmos confirmam o ganho de desempenho da PH-tree, conforme apresentado.

Em seguida, foi realizado o experimento utilizando especificações ordenadas, algo que não havia sido apresentado no trabalho anterior, utilizando tanto indexação explícita quanto implícita. A especificação de dimensões ordenada pressupõe que os dados gerenciados sejam densos, neste caso, todas as possíveis combinações de coordenadas devem possuir valores associados em memória, definindo uma malha regular. Para a geração da malha no primeiro caso (indexação explícita), foram gerados dois vetores de coordenadas LAT e $LONG$, os quais abrangem todos os valores individuais de latitude e longitude existentes no *dataset*, respectivamente. Assim, para cada par de coordenadas $(lat, long)$ de $\{LAT \times LONG\}$, o valor de precipitação atribuído ao ponto em questão foi definido como o valor registrado na coordenada correspondente no *dataset* original. Caso o valor não exista no *dataset*, foi atribuído valor -1 , uma vez que o sistema não possui suporte para representação de valores nulos ao ser utilizada especificação de dimensão ordenada.

Para o segundo experimento, foi utilizada indexação de dimensões ordenadas implícitas. Neste caso, conforme implementação no SAVIME, a dimensão pressupõe que os índices sejam regularmente definidos e ordenados com base em um valor inicial não negativo e um valor final e intervalo definidos pelo usuário. Assim, cada coordenada registrada no *dataset* foi transladada a partir da posição $(0, 0)$, conforme a expressão:

$$(lat'_i, long'_j) = (E * (lat_i - \min(LAT)), E * (long_j - \min(LONG)))$$

onde $LAT = \{lat_i\}$ e $LONG = \{long_j\}$ definem as coordenadas de latitude presentes no *dataset* original, arredondadas em uma casa decimal, e $E = 10$ define o fator de escala considerado. Novamente para os valores sobre os quais não haviam dados referentes à precipitação registrados no *dataset* original, foi realizado um processo de interpolação atribuindo um valor constante (-1) a todos os pares de coordenadas não definidos.

Com o objetivo de realizar uma análise comparativa, houve a necessidade de medir o tempo de inserção do *dataset* COSMO tanto na Ph-tree quanto no SAVIME. Conforme demonstrado na Figura 1, o tempo de inserção dos dados do *dataset* COSMO é demasiadamente alto na Ph-tree quando comparado ao SAVIME independente do tipo de dimensão utilizada. Isso ocorre devido ao fato de que, no SAVIME não há necessidade de realizar a conversão dos dados no momento da inserção dos mesmos.

Para a execução das análises comparativas restantes, houve a necessidade de realizar dois experimentos.

Experimento 1: Medir o tempo médio da execução das seguintes *point queries*.

Query a: subset(COSMO, tempo, 2001010000, 2001010000, latitude, -32.905, -32.905, longitude, -60.782, -60.782);

Query b: subset(COSMO, tempo, 2001010000, 2001010000, latitude, -22.373, -22.373, longitude, -50.975, -50.975);

Query c: subset(COSMO, tempo, 2012121500, 2012121500, latitude, -14.700,

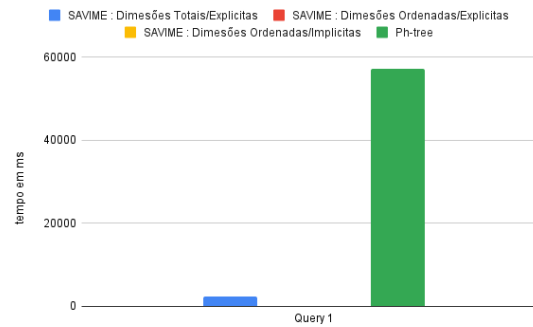


Figura 1. Tempo de Inserção dos dados do Dataset COSMO

-14.700, longitude, -52.350, -52.350);

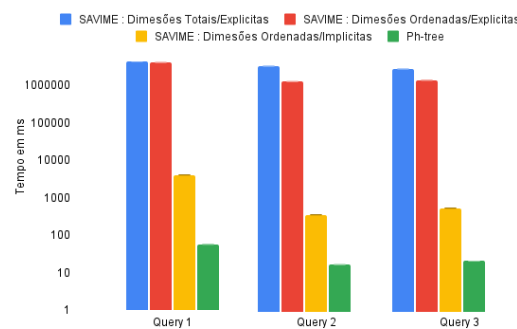


Figura 2. Tempo Médio das *point-queries* SAVIME vs Ph-tree em microssegundos

A Figura 2 exibe o tempo médio das dez execuções das *point queries*. Os dados são filtrados por três dimensões: latitude, longitude e tempo. A formatação da dimensão tempo segue o padrão ano/mês/dia/hora; por exemplo, a *query a* filtra dados para o instante de tempo referente ao dia 01/01/2020 as 00:00 horas. É perceptível notar que, a Ph-tree obteve um tempo médio menor em todas as *point queries* quando comparada ao SAVIME independente do tipo de índice de carregamento dos dados, isso ocorre em razão da Ph-tree possuir uma estrutura que realiza de maneira rápida a busca por dados, uma vez que, não há necessidade de procurar o dado em questão em todos os nós da árvore. Outro fator que vale a pena ressaltar, consiste na discrepância do tempo médio de execução das *point queries* no SAVIME quando se utiliza dimensões ordenadas implícitas para diferentes *queries*, o que consiste ainda a ser um fator analisado em um trabalho futuro. Outro fator a ser analisado em um trabalho futuro, consiste, no fato de que o tempo médio para as *point queries* utilizando dimensões explícitas tanto totais quanto ordenadas foi estatisticamente igual.

Experimento 2: Medir o tempo médio da execução das seguintes *range queries*.

Query 1: subset(COSMO, tempo, 2001010000, 2003200000);

Query 2: subset(COSMO, tempo, 2001010000, 2008210000);

Query 3: subset(COSMO, tempo, 2001010000, 2012120000);

Ao contrário das *point queries*, as *range queries* retornam mais de um valor. Em

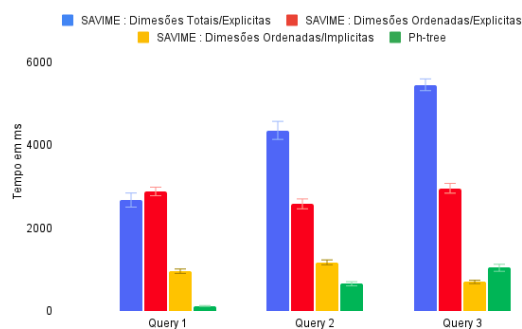


Figura 3. Tempo médio das *range-Queries* SAVIME vs Ph-tree

relação à Figura 3, para as *queries* 2 e 3 vale destacar a diferença do tempo médio de execução utilizando dimensões ordenadas implícitas ao apresentado pela Ph-tree. Para analisar esta diferença foram realizados para ambos os cenários, o teste de hipótese *T-Student*, o qual apresentou em ambos os casos um p-valor menor que 0.01, indicando que os resultados possuem significância estatística. Dimensões ordenadas implícitas possuem vantagem em relação às outras formas de indexação do SAVIME utilizadas no artigo, em virtude de simplificar o processo de busca dos dados no SAVIME, uma vez que, o limite inferior e superior do *array* é definido pelo próprio usuário, bem como o intervalo do mesmo. Para as *point queries*, o mesmo teste não indicou diferença estatística significativa entre o desempenho do SAVIME em dimensões Totais e Ordenadas explícitas.

4. Discussões e Direções de Pesquisa

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que é possível obter um tempo médio de execução no SAVIME semelhante e por vezes inferior ao registrado na Ph-tree, ao fazer uso de dimensões ordenadas implícitas. Em especial tal resultado pôde ser verificado para consultas do tipo *range queries*. Portanto, este artigo reforça a ideia de utilizar técnicas de armazenamento e acesso a dados distintas adequadas as características dos dados trabalhados. Além disso, pode-se observar a eficiência do SAVIME em lidar com *datasets* com grandes volumes de dados multidimensionais mantendo um bom desempenho quando comparado a outras estruturas de dados, quando utilizada a especificação de dimensão adequada.

Para trabalhos futuros, sugere-se a implementação do índice Ph-tree no SAVIME, o que poderia, diminuir drasticamente o tempo de execução de consultas independente da técnica de especificação de dimensão implementada. Outra linha de trabalho sugerida consiste em reproduzir o experimento utilizando dimensões parciais. Sugere-se também a análise comparativa dos mesmos pontos através de outros bancos de dados baseados em *arrays*.

agradecimentos. Este trabalho foi possível devido ao apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) através de uma bolsa de Iniciação Científica programa PIBIC (163670/2021-8), do Plano de Trabalho do LNCC “Técnicas de Ciências de Dados Aplicadas a Pesquisas Climáticas”.

Referências

- da Silva, A. C., Lustosa, H. L. S., da Silva, D. N. R., Porto, F. A. M., and Valduriez, P. (2020). Savime: An array dbms for simulation analysis and ml models prediction. *Journal of Information and Data Management*, 11(3).
- Herrera, S., da Silva, L. M., Reis, P. R., Silva, A., and Porto, F. (2021). Managing sparse spatio-temporal data in savime: an evaluation of the ph-tree index. pages 337–342.
- Lustosa, H., Lemus, N., Porto, F., and Valduriez, P. (2017). Tars: An array model with rich semantics for multidimensional data. In *Forum and Demos at ER*, number 1979, pages 114–127.
- Zäschke, T., Zimmerli, C., and Norrie, M. C. (2014). The ph-tree: a space-efficient storage structure and multi-dimensional index. pages 397–408.