

Consultas Métrico-Temporales

Andrés Pascal, Anabella De Battista

Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay

Norma Herrera

Universidad Nacional de San Luis, Departamento de Informática

Gilberto Gutierrez

Universidad del Bio Bio, Facultad de Ciencias Empresariales

Resumen

El modelo de bases de datos métrico-temporal permite abordar aquellas situaciones en las que resulta necesario realizar búsquedas por similitud teniendo en cuenta también un componente temporal. En este artículo presentamos los tipos de consultas métrico-temporales más relevantes sobre este modelo, y en particular se propone un algoritmo para resolver las búsquedas por similitud de los k vecinos más cercanos restringidas a un intervalo o instante temporal. Además se presentan resultados experimentales que comparan la eficiencia de este algoritmo versus la solución trivial.

Palabras Claves: Consultas métrico-temporales, Bases de Datos Métrico-Temporales, Espacios Métricos, Bases de Datos Temporales, Índices Métricos, Búsquedas por Similitud.

1. Introducción

Las bases de datos tradicionales permiten manipular eficientemente información estructurada en registros, donde cada uno posee campos totalmente comparables. Sobre este modelo se aplica el concepto de búsqueda exacta. El hecho de que las bases de datos actualmente permitan almacenar tipos de datos no estructurados, también conocidos como datos

multimedia (imágenes, audio, video, texto), y el hecho de que este tipo de información no pueda estructurarse, ha derivado en un nuevo paradigma de consulta denominado búsqueda por similitud. En este caso las búsquedas se basan en determinar el grado de similitud entre los objetos de la base. En algunas aplicaciones interesa, además de consultar por similitud, tener en cuenta el instante o intervalo de vigencia de los objetos. Como solución a esta problemática surgen varios modelos que permiten procesar esta clase de datos:

Espacios Métricos [6, 5, 4, 8] es un modelo de bases de datos que permite la manipulación de objetos multimedia y la realización de búsquedas por similitud sobre los mismos. Este tipo de búsqueda tiene una amplia gama de aplicaciones, como reconocimiento de imágenes y sonido, compresión de texto, biología computacional, inteligencia artificial y minería de datos, entre otras [9, 13].

Bases de Datos Temporales [11] permiten almacenar y recuperar datos que dependen del tiempo. Mientras que las bases de datos tradicionales tratan al tiempo como otro tipo de dato más, este modelo incorpora al tiempo como una dimensión. Por ejemplo, una consulta de interés en una base de datos temporal de una empresa podría ser: 'conocer el período de tiempo en que una persona fue emplea-

do de cierto departamento'. Existen tres clases de bases de datos temporales de acuerdo a la forma en que gestionan el tiempo: *de tiempo transaccional*, en este modelo el tiempo se registra en función al orden en que se procesan las transacciones; *de tiempo vigente*, registran el instante en que el hecho ocurrió en la realidad (que puede no coincidir con el momento de su registro) y *bitemporales*, que integran las dimensiones transaccional y vigente a través del versionado de los estados, es decir, cada estado se modifica para actualizar el conocimiento de la realidad pasada, presente o futura, pero esas modificaciones se realizan generando nuevas versiones de los mismos estados.

Bases de Datos Métrico-Temporales [2, 3, 10] permiten realizar consultas por similitud teniendo en cuenta además el aspecto temporal. Permiten buscar objetos similares a uno dado cuyo intervalo de vigencia se superponga con el intervalo aportado en la consulta. Un ejemplo de aplicación de este modelo es el siguiente: supongamos que se tiene un registro fotográfico de las personas que ingresan a un museo y el período de tiempo que permanecieron en el mismo. Sobre dicha base se podría buscar, dada la especificación de un rostro y un intervalo temporal, cuáles eran las personas que tenían rasgos similares y permanecieron en el museo en ese período de tiempo.

En este artículo se realiza un resumen de los distintos tipos de consultas métrico-temporales y se propone un algoritmo para resolver las consultas temporales por intervalo o instante, en combinación con los k vecinos más cercanos respecto al grado de similitud. También se presentan resultados experimentales que muestran la eficiencia de este algoritmo en comparación con la solución trivial.

2. Marco Teórico

En este apartado se define y explica el modelo *Métrico-Temporal*, que permite combinar consultas por similitud basadas en el

Modelo de Espacios Métricos, con búsquedas que incluyen alguna variable tiempo como uno de sus parámetros principales, soportadas por el Modelo Temporal. El modelo *métrico-temporal* está orientado a satisfacer búsquedas sobre objetos no estructurados que poseen instantes o intervalos de tiempo asociados y que además no pueden ser recuperados a través de un atributo clave mediante una búsqueda exacta.

2.1. Espacio Métrico-Temporal

Sea U un universo de objetos válidos, en su forma más general se define un Espacio Métrico-Temporal mediante el par (X, d) , donde $X = U \times N \times N \times N \times N$ y la métrica $d : U \times U \rightarrow R^+$. Cada elemento $x \in X$ es una 5-upla $(o, t_{vi}, t_{vf}, t_{ti}, t_{tf})$, donde o es un objeto (una huella digital, un rostro, un sonido, etc), $[t_{vi}, t_{vf}]$ es el intervalo de validez de o en la realidad y $[t_{ti}, t_{tf}]$ el intervalo de tiempo transaccional asociado. Por simplicidad, se definen todos los tiempos como valores pertenecientes al conjunto N . Estos valores pueden ser fechas, horas, etc., pero en cualquier caso se pueden representar mediante números naturales. La función de distancia d mide la disimilitud entre dos objetos y cumple con las propiedades de toda métrica, es decir, positividad, simetría, reflexividad y desigualdad triangular.

Las situaciones problemáticas que este nuevo modelo de bases de datos permite resolver, se caracterizan a través de los siguientes puntos:

- No tiene sentido realizar búsquedas exactas sobre los objetos, es decir, los elementos de la base de datos no tienen una clave que se pueda utilizar en la búsqueda, o la clave existe pero no está almacenada en la base de datos al momento de consultar, o existe y se encuentra registrada, pero la consulta en si no contiene la clave.
- Los objetos poseen uno o dos instantes o intervalos de validez asociado. Uno de estos intervalos representa el período en el

cual el objeto se encuentra vigente en la realidad, por ejemplo, el instante en que se registra una huella digital en el acceso a un edificio. El segundo intervalo representa el periodo de tiempo en el cual el objeto se dió de alta en la base de datos hasta su baja, ya sea por modificación o eliminación.

- Existen consultas en las cuales se requiere combinar las búsquedas por similitud con el aspecto temporal. Puede ser requerido también, realizar consultas por similitud puras o consultas temporales puras.
- La base de datos contiene una cantidad suficientemente grande de objetos, o bien, el tiempo de respuesta ante una consulta debe ser suficientemente reducido como para que no tenga sentido realizar una búsqueda secuencial.

2.2. Métodos de Acceso Métrico-Temporales

En los últimos años se han desarrollado índices métrico-temporales que permiten realizar consultas por similitud y temporal con eficiencia. Estos son: el *FHQT-Temporal* [10] y su variante para funciones de distancia continua *FHQT⁺-Temporal*, el *Event-FHQT* [9] y su variante *Event-FHQT⁺*, el *Historical-FHQT* [3] y el *Pivot-FHQT* [1]. En esta sección se describe el *FHQT⁺-Temporal*, sobre el cual se plantean las consultas métrico-temporales y se propone, en particular, un algoritmo para resolver eficientemente la búsqueda *NN_k/rank/-* para el *FHQT⁺-Temporal*.

2.3. FHQT⁺-Temporal

El *FHQT-Temporal* es un FHQT al cual se le agrega un intervalo de tiempo en cada nodo del árbol. Este intervalo representa el período de tiempo de vigencia de todos los objetos del subárbol cuya raíz es dicho nodo. En cada nodo hoja, este intervalo es el período total de vigencia de los objetos que contiene. Para un no-

do interior, el intervalo se calcula tomando el tiempo inicial mínimo y el tiempo final máximo de sus hijos.

En la Figura se muestra el esquema genérico del *FHQT-Temporal*. La estructura es dinámica, permitiendo tanto altas como bajas ya sea de instantes o intervalos contenidos en el intervalo que el índice posee hasta el momento, como de objetos con tiempos fuera de éste. En ambos casos el costo de la inserción, medido en cantidad de evaluaciones de la función de distancia, es el costo de calcular la firma del nuevo objeto.

El *FHQT⁺-Temporal* es una variante del *FHQT-Temporal* generalizada que soporta valores continuos de la función de distancia. Para ello, en lugar de asociar un número natural a cada hijo de un nodo, se asocian dos intervalos de valores de distancias. El primer intervalo representa el rango máximo correspondiente a la rama, mientras que el segundo (incluido en el anterior) constituye el rango actual de valores, es decir, el intervalo formado por el mínimo y el máximo valor de distancia del pivote a los objetos contenidos en las hojas del subárbol. Los intervalos máximos son constantes y se calculan cuando se construye el árbol en base al histograma de distancias, de tal manera de que el árbol tenga una alta probabilidad de quedar balanceado. Los intervalos actuales son variables y se van actualizando de acuerdo a los objetos que se insertan en la estructura. Para determinar en qué rama se agrega un nuevo elemento, se utilizan los intervalos máximos y ante una consulta sólo se usan los actuales. Al utilizar estos últimos intervalos en las búsquedas, se incrementa la capacidad de filtrado por similitud, ya que los intervalos son más pequeños y quedan espacios vacíos entre intervalos consecutivos, como veremos más adelante.

2.3.1. Estructura

Un *FHQT⁺-Temporal* es un árbol r -ario donde el valor de r es un parámetro que se define en forma previa a su construcción, normalmente en base a la distribución del histograma

de distancias.

Formalmente, un *FHQT⁺-Temporal* es un árbol donde:

- todo nodo interior V es una 3-upla $(t_{ini}, t_{fin}, \{(int_{x1}, int_{a1}, h_1), (int_{x2}, int_{a2}, h_2), \dots, (int_{xm}, int_{am}, h_m)\})$ donde:
 - $h_1..h_m$ son los m hijos del nodo V ,
 - los int_{xi} , para $i = 1..m$, son los intervalos *máximos* de distancias entre el pivote correspondiente al nivel de V y los objetos que pueden pertenecer a las hojas de los subárboles de h_i .
 - los int_{ai} , para $i = 1..m$, son los intervalos *actuales* de distancias entre el pivote correspondiente al nivel de V y los objetos contenidos actualmente en las hojas de los subárboles de h_i .
 - los dos primeros componentes de la 3-upla, t_{ini} y t_{fin} , se definen de la siguiente manera: $t_{ini} = \min_{j=1..m}(t_{ini}(h_j))$, y $t_{fin} = \max_{j=1..m}(t_{fin}(h_j))$.
- Las hojas se definen de la misma forma que para el *FHQT-Temporal*

Para calcular los intervalos máximos correspondientes al nodo raíz del árbol, se toma una muestra de la base de datos, se calcula el histograma de distancias y se divide el espacio en r intervalos, de tal manera de que cada uno de ellos posea la misma cantidad (± 1) de elementos. Luego para cada nodo hijo se procede de la misma manera, pero considerando solo los elementos de la muestra que fueron asignados a dicho nodo. De esta manera todos los nodos interiores tendrán exáctamente r hijos.

Una vez definidos los rangos, se realiza la inserción de los elementos, actualizando los intervalos actuales. Sea o el objeto a insertar, v el nodo donde se quiere insertar el objeto, $[d_{xi}, d_{xf}]$ y $[d_{ai}, d_{af}]$ los intervalos máximo y actual asociados al nodo, y p el pivote del nivel, primero se verifica que $d(p, o) \in [d_{xi}, d_{xf}]$

y si esto se cumple, se actualiza el intervalo actual haciendo $d_{ai} := \min(d_{ai}, d(p, o))$ y $d_{af} := \max(d_{af}, d(p, o))$. El aspecto temporal se procesa de la misma manera que en el *FHQT-Temporal*. En la Figura 1 se muestra un ejemplo del *FHQT⁺-Temporal*.

Este índice permite resolver consultas por similitud puras, temporales puras y métrico-temporales con funciones de distancia tanto continuas como discretas.

3. Consultas Métrico-Temporales

Los tipos de consultas métrico-temporales resultan de combinar los tipos de consultas por similitud (por rango y de los k vecinos más cercanos) con los tipos de consultas temporales (rango e instantánea correspondientes a las dimensiones transaccional y válida). Para ello se introduce una notación similar a la de tres entradas definida para el modelo temporal en [12]. La terna *similarity/valid/transaction* indica a través de su primer entrada el tipo de consulta por similitud, *range* o *NN_k*, la segunda entrada el tipo de consulta de tiempo válido, *rank* o *point*, y la tercera el tipo de consulta de tiempo transaccional.

Sea $X \subseteq U \times N \times N \times N \times N$ el conjunto finito de objetos contenidos en la base de datos con sus tiempos asociados, los tipos de consultas métrico-temporales más importantes son:

1. **range/rank/-** y **range/-/rank** Devuelve todos los objetos similares a uno dado dentro de un radio de tolerancia, que poseen un tiempo de validez (primer tipo) o de transacción (segundo tipo) que se intersecta con un intervalo dado. Formalmente se denota mediante la 4-upla $(q, r, t_{vi}, t_{vf})_d$ y se define como:

$$(q, r, t_{vi}, t_{vf})_d = \{o / (o, t_{vio}, t_{vfo}, t_{tio}, t_{tfo}) \in X \wedge d(q, o) \leq r \wedge (t_{vio} \leq t_{vf}) \wedge (t_{vi} \leq t_{vfo})\}$$

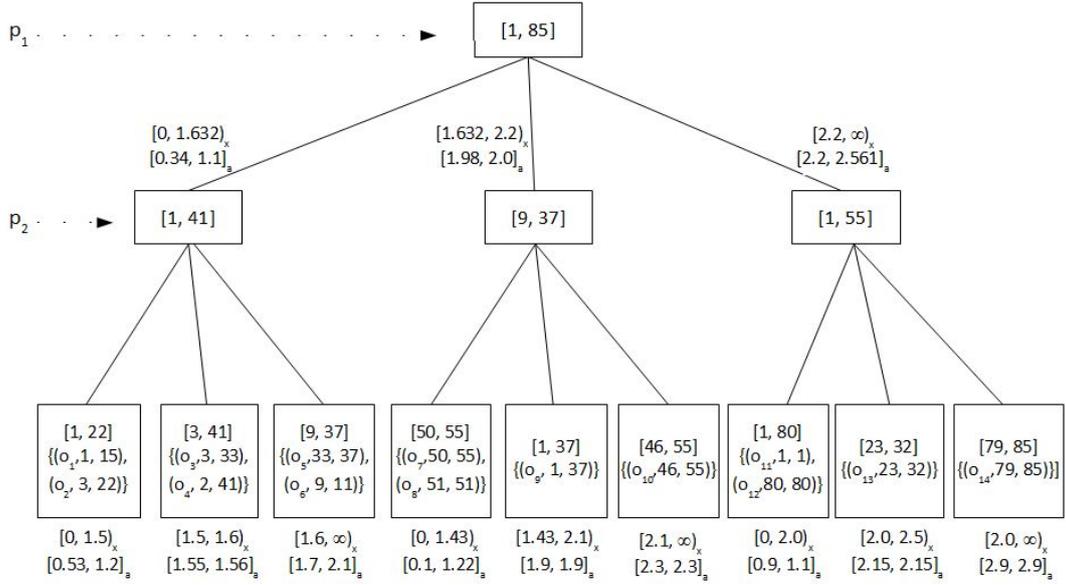


Figura 1: Ejemplo de un FHQT⁺-Temporal

La variable q es el objeto que se consulta y r es el radio de búsqueda que representa el grado de similitud requerido. Las variables t_{vi} y t_{vf} son el tiempo inicial y final respectivamente, del intervalo consultado. El intervalo puede hacer referencia al tiempo válido o transaccional, según se requiera.

2. **range/point/-** y **range/-/point** Consultas similares a las anteriores, pero con $t_{vi} = t_{vf}$, es decir, en lugar de un intervalo se consulta sólo un instante.
3. **NN_k/rank/-** y **NN_k/-/rank** Devuelve los k objetos con mayor similitud a uno dado, que poseen un tiempo de validez (primer caso) o transacción (segundo caso) que se intersecta con un intervalo dado. Sea X una base de datos métrico-temporal, una consulta **NN_k/rank/-** se denota mediante la 4-upla $(q, k, t_{vi}, t_{vf})_d$ y devuelve el conjunto A , que cumple:

$$\begin{aligned}
 A &\subseteq X \wedge \\
 |A| &= k \wedge \\
 \forall x &= (o, t_{vio}, t_{vfo}, -, -) \in A, \\
 y &= (p, -, -, -, -) \in (X - A) : \\
 d(q, o) &\leq d(q, p) \wedge \\
 (t_{vio} \leq t_{vfo}) &\wedge (t_{vi} \leq t_{vf})
 \end{aligned}$$

La variable q es el objeto que se consulta y k es la cantidad de elementos más cercanos a q que se quiere obtener y las variables t_{vi} y t_{vf} son el tiempo inicial y final respectivamente, del intervalo válido consultado. Los $-$ indican que dicho valor es irrelevante para la consulta. De manera similar, se puede plantear la consulta **NN_k/-/rank** utilizando el tiempo transaccional en lugar del tiempo válido.

4. **NN_k/point/-** y **NN_k/-/point** Consultas similares a las anteriores, pero con $t_{vi} = t_{vf}$.
5. Las consultas anteriores se pueden extender a las dos dimensiones temporales, generando consultas tales como **range/rank/rank**, **NN_k/rank/rank**, **range/point/rank** y las demás combinaciones. En la práctica para estos tipos se pueden utilizar algoritmos similares a los definidos para una sola dimensión temporal.

Una forma trivial de resolver las consultas métrico-temporales que incluyen búsqueda por rango (por ejemplo, los tipos 1 y 2 enumerados anteriormente) sin recorrer la base de datos completa es utilizando un Índice métrico de la siguiente manera:

1. Realizar una búsqueda por similitud sobre el índice métrico
2. Realizar una búsqueda secuencial sobre el conjunto de objetos resultantes del paso anterior, para obtener los que cumplen con la restricción temporal

En el caso de las consultas tipo NN_k , no existen soluciones simples (que no sea la búsqueda secuencial, por supuesto). El problema es que a diferencia de las búsquedas por rango, encontrar los k elementos requeridos depende de la interrelación del aspecto métrico con el aspecto temporal, por lo cual no se puede sólo realizar una búsqueda sobre un índice métrico y luego filtrar los elementos temporalmente, ya que esto en la mayor parte de los casos reduce la cantidad de resultados. Es decir que la solución más simple requiere repetir el proceso hasta encontrar los k elementos buscados:

- $r = 0$
- $m = k$
- Mientras $r \leq k$
 - Realizar una búsqueda por similitud $NN(m)$ sobre el índice métrico
 - Realizar una búsqueda secuencial sobre el conjunto de objetos resultantes del paso anterior, para obtener los que cumplen con la restricción temporal (la cantidad de elementos resultantes es r)
 - $m = m + \alpha$

El ciclo se repite incrementando la cantidad de elementos buscados en un valor α hasta encontrar los k más cercanos dentro del rango temporal. Note que si no existen más de k elementos en el intervalo de tiempo consultado, es necesario incrementar m hasta alcanzar el tamaño de la base de datos completa.

La desventaja que tienen estas soluciones es que no utilizan ambos aspectos a la vez para filtrar los objetos que no pueden formar parte del resultado. Por esta razón, tiene sentido definir métodos de acceso especialmente

diseñados que aprovechen tanto la componente métrica como la temporal para descartar elementos.

3.1. Consultas range/rank/-

Cuando se realiza una consulta métrico-temporal, ya sea de tipo *range/rank/-* (rango de similitud / intervalo válido) o *range/point/-* (rango de similitud / instante válido), se procede de la siguiente manera: en cada nivel del árbol, se seleccionan los subárboles hijos del nodo que se está procesando, cuyos intervalos temporales se intersectan con el intervalo o instante de la consulta. De éstos, posteriormente se eligen los que cumplen con la restricción de similitud tomando en cuenta la firma de la consulta y el radio de búsqueda. Este procedimiento se repite hasta llegar al último nivel. Para cada hoja no descartada, luego de verificar la superposición temporal, se realiza una búsqueda secuencial sobre todos los elementos contenidos en las mismas, comparando tanto el aspecto temporal como la distancia de cada elemento a la consulta.

Formalmente, sea $(q, r, t_{iq}, t_{fq})_d$ una consulta métrico-temporal por rango de similitud y tiempo válido, $[t_{ini}, t_{fin}]$ el intervalo correspondiente al nodo que se está procesando, y $\{(d_1, h_1), (d_2, h_2), \dots, (d_m, h_m)\}$ los hijos del nodo y sus distancias al pivote del nivel, primero se comprueba si $(t_{ini} \leq t_{fq}) \wedge (t_{iq} \leq t_{fin})$, es decir, si el intervalo de la consulta contiene al menos un instante en común con el intervalo del nodo. Si satisface esta condición, se recorren sus m nodos hijos, ingresando solo a los subárboles h_j que cumplan con la restricción de similitud. Los demás hijos se descartan. Finalmente, cuando se alcanzan las hojas, se recorren los objetos contenidos en cada una de ellas y se seleccionan los que cumplen tanto con la condición temporal como con la condición de similitud $d(q, o_i) \leq r$.

El algoritmo de consulta por rango de similitud y tiempo válido (Figura 2) se define recursivamente y está dividido en dos funciones. En la primera se calcula la firma del objeto que se consulta –para que la firma se compute una

```

Range/Rank/-  $(q, r, t_{iq}, t_{fq})d$ 
1. calcular  $f$  de  $q$  –  $f$  es la firma de  $q$ 
2. return Consultar( $q, r, t_{iq}, t_{fq}, 1, f, raiz$ )

donde Consultar se define recursivamente como:

Consultar( $q, r, t_{iq}, t_{fq}, n, f, x$ ) –  $n$  es el nivel del nodo actual  $x$ 
1. Sea  $[t_{ix}, t_{fx}]$  el intervalo asociado al nodo  $x$ 
2. resultado:= $\emptyset$ 
3. if ( $[t_{ix}, t_{fx}] \cap [t_{iq}, t_{fq}] \neq \emptyset$ ) then
4.   if esHoja( $x$ ) then
5.     for all objeto ( $o \in x$ )
6.       if ( $[t_{io}, t_{fo}] \cap [t_{iq}, t_{fq}] \neq \emptyset$ )  $\wedge$  ( $d(q, o) \leq r$ ) then
7.         resultado :=resultado  $\cup$   $\{o\}$ 
8.     else
9.       for all hijo ( $h_i \in x$ )
10.        if  $[f_n - r, f_n + r] \cap int_{ai} \neq \emptyset$  then
11.          resultado :=resultado  $\cup$  Consultar( $q, r, t_{iq}, t_{fq}, n + 1, f, h_i$ )
12. return resultado

```

Figura 2: $FHQT^+$ -Temporal: pseudocódigo de consulta por rango e intervalo de tiempo

sola vez– y luego se invoca a la función *Consultar*, que es la que realiza la búsqueda en sí. Esta segunda función recorre el árbol descartando las ramas que no cumplen con las restricciones temporales o métricas y procesando las demás. Cuando se alcanzan las hojas, se realiza una búsqueda secuencial sobre los objetos contenidos en las mismas, devolviendo aquellos que cumplen ambas condiciones.

3.2. Consultas NN_k /rank/-

La estrategia que se propone para realizar consultas métrico-temporales que involucran el cálculo del vecino más cercano en un intervalo o instante de tiempo es la siguiente. En primer lugar se calculan los nodos hoja que cumplen la restricción temporal, ordenados de menor a mayor de acuerdo al mínimo radio necesario para ser incluidos en una búsqueda por rango. El mínimo valor de radio para que una hoja sea visitada, es la diferencia máxima entre los valores de la firma y los intervalos correspondientes. Por ejemplo, en el $FHQT^+$ -Temporal de la Figura 1, ante una consulta cuya firma es $(2, 1)$, la cuarta hoja (de izquierda a derecha) tendrá a 0 como radio mínimo

para poder ser accedida, ya que 2 está incluido en el intervalo de distancias al primer pivote y 1 en el intervalo correspondiente al segundo pivote, mientras que para la quinta hoja el radio mínimo será 0,9 (correspondiente al segundo pivote: $1,9 - 1 = 0,9$) y para la sexta hoja será 1,3 ($2,3 - 1$), diferencia correspondiente también a la diferencia del segundo valor de la firma. Esta estrategia define un orden para la búsqueda de los más cercanos, que hace que sólo sea necesario recorrer una vez el árbol (normalmente en forma parcial), a diferencia de otras soluciones en las cuales se realiza una serie de búsquedas por rango incrementando el radio en un valor arbitrario hasta encontrar los k elementos más cercanos. Luego de calcular las hojas con los candidatos, se realiza un recorrido secuencial de las mismas, teniendo en cuenta el orden anterior, hasta encontrar los k elementos buscados.

En la Figura 3 se muestra el algoritmo de consulta del vecino más cercano e intervalo temporal. El mismo consta de dos funciones. La función *CalcularHojas* calcula y devuelve una lista de pares (*hoja, distancia*) ordenada de menor a mayor por el segundo elemento que representa, como se expresó an-

```

 $NN_k/\text{Rank}/-$  ( $q, k, t_{iq}, t_{fq}$ ) $_d$ 
1. calcular  $f$  de  $q$  –  $f$  es la firma de  $q$ 
2.  $hojas := \text{CalcularHojas}(t_{iq}, t_{fq}, 1, f, raiz, 0)$ 
3.  $resultado := ()$  – lista vacia, de pares (objeto, distancia)
4.  $c := 1$ 
5. while ( $c \leq \text{length}(hojas) \wedge$ 
   ( $\text{length}(resultado) < k \vee \text{resultado}_{\text{length}(resultado)}.distancia > hojas_c.distancia$ )) do
6.   for all ( $o \in hojas_c.hijos$ )
7.     if ( $[t_{io}, t_{fo}] \cap [t_{iq}, t_{fq}] \neq \emptyset$ ) then
8.        $agregar((o, d(q, h)), resultado)$ 
9.      $c := c + 1$ .
10. return  $\text{primeros}(k, resultado)$ 

```

donde **CalcularHojas** se define recursivamente como:

```

CalcularHojas( $t_{iq}, t_{fq}, n, f, x, distancia$ ) –  $n$  es el nivel del nodo actual  $x$ 
1. Sea  $[t_{ix}, t_{fx}]$  el intervalo asociado al nodo  $x$ 
2.  $resultado := ()$  – lista vacia, de pares (hoja, distancia)
3. if ( $[t_{ix}, t_{fx}] \cap [t_{iq}, t_{fq}] \neq \emptyset$ ) then
4.   if esHoja( $x$ ) then
5.      $agregar((x, distancia), resultado)$ 
6.   else
7.     for all hijo ( $h \in x$ )
8.       if  $f_n < \text{int}_{ah}.desde$  then
9.          $\text{max} := \text{int}_{ah}.desde - f_n$ 
10.      elseif  $f_n \geq \text{int}_{ah}.hasta$  then
11.         $\text{max} := f_n - \text{int}_{ah}.hasta$ 
12.      if  $\text{max} > distancia$  then
13.         $distancia := \text{max}$ 
14.      for all  $par \in \text{CalcularHojas}(t_{iq}, t_{fq}, n + 1, f, h, distancia)$ 
15.         $agregar(par, resultado)$ 
16. return resultado

```

Figura 3: $FHQT^+$ -Temporal: pseudocódigo de consulta NN_k e intervalo de tiempo

teriormente, el radio mínimo para ser tomada en cuenta. Esta función realiza el primer filtro temporal. La función principal invoca a *CalcularHojas* y recorre la lista de elementos resultantes controlando el aspecto temporal y construyendo una nueva lista, ordenada de menor a mayor por distancia a la consulta. Al final, se devuelven los k primeros elementos de esta lista, o un número menor si es que no existen k elementos que cumplan con la restricción temporal. Note que en la solución trivial, para este último caso habría que recorrer la base de datos completa e inclusive comparar algunos elementos más de una vez, mediante el uso reiterado del índice métrico con radios de búsqueda cada vez mayores.

4. Resultados experimentales

Para el análisis de la eficiencia de las consultas métrico-temporales $NN_k/\text{rank}/-$, se realizaron experimentos tomando como costo la cantidad de evaluaciones de la función de distancia, ya que el índice se mantuvo en memoria principal y se sabe que las funciones de distancia normalmente poseen complejidad computacional mayor que las demás operaciones que forman parte del procesamiento de la consulta.

Por otro lado, cuando este tipo de situaciones no es frecuente y además las consultas son instantáneas o por intervalos reducidos, la eficiencia del *FHQT-Temporal* aumenta

considerablemente ya que el filtrado temporal se hace más importante y supera a la solución trivial. En el Capítulo ?? se muestran resultados experimentales que muestran comparativamente la eficiencia de este índice versus la solución trivial.

Respecto al costo espacial, el *FHQT-Temporal* tiene prácticamente los mismos requisitos que un *FHQT*, ya que solamente se deben agregar los dos valores numéricos correspondientes al intervalo de tiempo de cada nodo. El complejidad espacial de un *FHQT*, medida en cantidad de punteros necesarios para construir la estructura, es nh , donde n es la cantidad de objetos y h la altura del árbol (considerando que la cantidad de pivotes $k = \log(n)$ [7]). El *FHQT-Temporal* tiene el mismo costo que el *FHQT*, si sólo se tiene en cuenta la cantidad necesaria de punteros para mantener la estructura.

5. Discusión

Las resolución de consultas en grandes bases de datos constituye un problema largamente estudiado y con muy buenas soluciones en algunos casos. En este trabajo se estudió el problema de aquellas consultas por similitud sobre grandes bases de datos de objetos no estructurados que involucran al menos una dimensión temporal. Para ello se definió el modelo métrico-temporal para ambas dimensiones del tiempo –válido y transaccional–, se diseñaron métodos de acceso para resolver consultas métrico-temporales eficientemente y se realizaron experimentos que verificar el comportamiento de los mismos ante variaciones de distintos parámetros. Como consecuencia de este estudio, han surgido cuestiones a resolver en futuras investigaciones debido a limitaciones de los métodos propuestos y a necesidades de expansión y aplicación de los mismos. A continuación se describen brevemente las principales:

- El aspecto temporal de las consultas planteadas implica en todos los casos superposición temporal entre los intervalos/instantes involucrados.

Existen otros tipos de consultas temporales tales como “before” o “after” (es decir, que un intervalo o instante se encuentre “antes” o “después” de otro) que no se tuvieron en cuenta. La notación *similarity/valid/transaction* introducida en este estudio se podría extender para admitir éstos y otros tipos de consultas temporales.

- Las consultas evaluadas fueron de tipo *range/rank/-* y *range/point/-*. Existen varios otros tipos de consultas para las cuales se requieren diseñar algoritmos y realizar experimentos. Por ejemplo, las consultas métrico-temporales que involucran los k vecinos más cercanos; las que tienen en cuenta ambas dimensiones temporales, y además, todas las consultas métricas o temporales puras.
- El *FHQT-Temporal* tiende a disminuir su eficiencia ante el aumento de la cantidad de elementos debido al problema de los objetos similares distantes en el tiempo. Este índice podría rediseñarse duplicando ramas con las mismas distancias (es decir, correspondientes a las mismas firmas) de tal manera de que cada una contenga un grupo de únicamente objetos cercanos en el tiempo.
- El tamaño de los intervalos de la *Línea del Tiempo* del *Event-FHQT* actualmente es fijo. Si la distribución de los objetos en el tiempo no es uniforme, probablemente sea conveniente utilizar intervalos de amplitud variable para que la cantidad de objetos por cada intervalo no sea muy diferente. Otra variación posible es la modificación la cantidad de pivotes utilizada en cada intervalo, de tal manera de que sea función de la cantidad de objetos o eventos asociados al intervalo.
- Ambas variantes para distancias continuas de los índices presentados necesitan mayor experimentación. Por ejemplo, se

requieren criterios para calcular la cantidad óptima de ramas y para decidir si dicha cantidad debe mantenerse en todos los nodos o si es más conveniente que sea particular para cada nodo. Por otro lado, es de notar que esta adaptación para distancias continuas es aplicable también a índices métricos puros como el FHQT, FQT y FQA. Este es un resultado lateral importante.

- Todos los métodos presentados suponen su procesamiento en memoria principal. Se requiere investigar su adaptación a memoria secundaria ya que para bases de datos muy grandes, la primer opción sería muy costosa o imposible de realizar.
- Las consultas al *Event-FHQT* podrían resolverse utilizando paralelismo debido a que los FHQTs correspondientes a distintos intervalos son independientes entre sí.
- Existen métodos de selección de pivotes, pero sólo toman en cuenta el aspecto métrico. Es conveniente analizar si es necesario definir nuevas formas para elegir los pivotes, que además del aspecto métrico tengan en cuenta el aspecto temporal, y si existe la necesidad, diseñar nuevas técnicas con este fin.
- Se podría considerar el aspecto temporal agregando dimensiones al vector que describe cada objeto y definiendo una función de distancia que mida ambos aspectos a la vez. Esta opción inicialmente tiene algunos inconvenientes, como por ejemplo que no todos los objetos se representan mediante vectores o que usualmente no interesa la cercanía temporal de dos objetos sino su inclusión, intersección, adyacencia, etc. Aún así, este enfoque constituye una opción a analizar con mayor profundidad para determinar su validez.
- En la aplicación de métodos y técnicas a la resolución de problemas concretos,

usualmente se requiere configurar, adaptar y ajustar los modelos teóricos a las características particulares del problema. En este aspecto, se considera conveniente el estudio de casos de uso donde se utilicen índices métrico-temporales para definir pautas que permitan determinar rangos de valores convenientes para cada uno de los parámetros. Por ejemplo, la cantidad de pivotes, el tamaño de los intervalos del *Event-FHQT*, la cantidad de ramas para las variantes continuas o la función de distancia más adecuada para resolver el problema.

6. Conclusión

Referencias

- [1] A. De Battista, A. Pascal, N. Herrera, and G. Gutierrez. Metric-temporal access methods. *Journal of Computer Science & Technology*, 10(2):54–60, 2010.
- [2] De Battista, A. Pascal, G. Gutierrez, and N. Herrera. Búsqueda en bases de datos métricas-temporales. In *Actas del VIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación*, Buenos Aires, Argentina, 2006.
- [3] De Battista, A. Pascal, G. Gutierrez, and N. Herrera. Un nuevo índice métrico-temporal: el historical fhqt. In *Actas del XIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, Corrientes, Argentina, 2007.
- [4] S. Brin. Near neighbor search in large metric spaces. In *Proc. 21st Conference on Very Large Databases (VLDB'95)*, pages 574–584, 1995.
- [5] E. Chávez and K. Figueroa. Faster proximity searching in metric data. In *Proceedings of MICA 2004. LNCS 2972*, Springer, Cd. de México, México, 2004.

- [6] E. Chávez, G. Navarro, R. Baeza-Yates, and J. Marroquín. Proximity searching in metric spaces. *ACM Computing Surveys*, 33(3):273–321, 2001.
- [7] Edgar Chávez, Gonzalo Navarro, Ricardo Baeza-Yates, and José Luis Marroquín. Searching in metric spaces. *ACM Comput. Surv.*, 33(3):273–321, 2001.
- [8] G. Navarro. Searching in metric spaces by spatial approximation. In *Proc. String Processing and Information Retrieval (SPIRE'99)*, pages 141–148. IEEE CS Press, 1999.
- [9] A. Pascal, A. De Battista, G. Gutierrez, and N. Herrera. Índice métrico-temporal event-fhqt. In *Actas del XIII Congreso Argentino de Ciencias de la Computación*, La Rioja, Argentina, 2008.
- [10] A. Pascal, De Battista, G. Gutierrez, and N. Herrera. Procesamiento de consultas métrico-temporales. In *XXIII Conferencia Latinoamericana de Informática*, pages 133–144, Costa Rica, 2007.
- [11] B. Salzberg and V. J. Tsotras. A comparison of access methods for temporal data. *ACM Computing Surveys*, 31(2), 1999.
- [12] R. Snodgrass and C.S. Jensen. Private communication. 1996.

Datos de Contacto: Andrés Pascal. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Dpto. Sistemas de Información. Ing. Pereira 676, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina. pascala@frcu.utn.edu.ar.

Anabella De Battista. Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Concepción del Uruguay, Dpto. Sistemas de Información. Ing. Pereira 676, Concepción del Uruguay, Entre Ríos, Argentina. debattista@frcu.utn.edu.ar.