

Grafos y Temporalidad en Bases de Datos

Una aplicación sobre Datos Abiertos Enlazados

Carlos Buckle¹, Marcos Zárate^{1,2}, Leo Ordinez¹, Damián Barry¹

¹ Laboratorio de Investigación en Informática (LINVI), Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB), Puerto Madryn, Argentina.

² Center for the Study of Marine Systems, Patagonian National Research Center, (CENPAT-CONICET), Puerto Madryn, Argentina.

cbuckle@unpata.edu.ar, zarate@cenpat-conicet.gob.ar,
{leo.ordinez,demian.barry}@gmail.com

Resumen

Diferentes tipos de sistemas han encontrado una alternativa de modelado utilizando grafos. En particular, las bases de datos. Una necesidad común a todos ellos ha sido la de incorporar la dimensión temporal. Este trabajo presenta un análisis de las principales teorías y modelos desarrollados para *Grafos Temporales* y *RDF Temporal* y los vincula bajo una misma clasificación simple de acuerdo a las estrategias de modelado utilizadas, como instrumento orientador al momento de resolver diseños sobre grafos con temporalidad. Adicionalmente, enfoca y amplía sobre las posibilidades de RDF para la incorporación de semántica temporal. El aporte aplicado del trabajo consiste en la extensión, hacia un RDF Temporal, de un modelo conceptual denominado *BiGe-Onto* del dominio de la biodiversidad marina. La extensión desarrollada utiliza la ontología OWL-Time (estándar de W3C), la cual además, amplía las capacidades de descubrimiento de información por parte de investigadores que estudian fenómenos de conservación de especies que requieren ser interpretados en el tiempo.

Palabras clave: Grafos Temporales, RDF Temporal, Datos Abiertos Enlazados, OWL-Time, Bases de datos temporales.

1. Introducción

La teoría de grafos es una poderosa herramienta que permite estudiar diferentes problemas, sociales, naturales o de ingeniería. Una gran parte de los problemas a resolver pueden abordarse con una propuesta de solución orientada a grafos. Entre los sistemas que se pueden modelar con grafos están aquellos en los cuales la dimensión temporal es clave para una representación correcta, como es el caso de los sistemas dinámicos o sistemas que deben registrar cambios históricos en los objetos y/o sus relaciones. En este campo

comienzan a cobrar trascendencia los *Grafos Temporales* [1] referenciados como *temporal graphs*, *temporal networks*, *dynamics graphs* o *time-varying graphs*.

Un grafo temporal (G,T) refleja la dinámica de un sistema en el cual la existencia de los arcos entre los nodos del grafo G puede variar dentro del tiempo T . Incluso, los nodos pueden tener un tiempo de vida limitado en el sistema. La estructura temporal de activaciones de arcos y nodos en un grafo temporal permite realizar análisis de adyacencia, proximidad, centralidad, transitividad, camino más corto y otros, los cuales deben ser adaptados respecto de los análisis clásicos sobre un grafo estático. Detrás del grafo temporal existe un *grafo subyacente*, que es estático y se obtiene contemplando todos los nodos y todos los arcos que se activan en algún momento del tiempo de vida del sistema.

Respecto del modelado de Grafos Temporales, se han desarrollado muchas propuestas, que varían de acuerdo a las características del problema a resolver. A rasgos generales, se identifican dos mecanismos clásicos de modelado, uno es el de *versionado* (*snapshots*) y otro es el de *etiquetado* (*timestamp*). El *versionado* se basa en generar una nueva versión cada vez que cambia el estado del grafo. El *etiquetado* sin embargo, propone un único grafo agregando etiquetas de tiempo a los elementos sujetos a cambio.

De la variedad de sistemas que pueden aplicar modelos de Grafos Temporales, el presente trabajo se enfoca al modelado de *bases de datos temporales* [2], las cuales han sido inicialmente desarrolladas sobre bases de datos relacionales. Estas bases de datos manejan típicamente dos dimensiones temporales: el *tiempo de validez* y el *tiempo de transacción*. El primero es el período de tiempo en que un dato es válido en el mundo modelado. El segundo es el instante en que los datos son actualizados en la base de datos.

Las bases de datos orientadas a grafos, se caracterizan por incorporar tanto a los esquemas como a las instancias de los datos como grafos y manipularlos con operaciones también orientadas a grafos. Estos modelos comenzaron a desarrollarse a principio de los 80s; puede verse un compendio de su historia y principales trabajos en [3]. Si bien en su momento no llegaron a ser demasiado influyentes, han tomado especial trascendencia con la necesidad de manejar información de naturaleza interconectada con el surgimiento de la Web Semántica [4], las redes sociales [5] y los datos enlazados [6].

En este contexto, ha cobrado relevancia el uso de Resource Description Framework¹ (*RDF*) como una alternativa de datos estructurados en un grafo y sobre el cual hay un volumen creciente de información representada actualmente en la Web. Un grafo RDF $G=(S,P,O)$ es un multigrafo dirigido y rotulado, formado por tripletas (s,p,o) las cuales representan sentencias que conectan un sujeto (s) y un objeto (o) por medio de un predicado (p). Cada tripleta es un arco $s \rightarrow^p o$ en el grafo. Debe considerarse el conjunto $S=(\hat{I} \cup \beta)$, donde \hat{I} son todos los recursos del sistema identificados por una *IRI* (*Internationalized Resource Identifier*) y β son *Blank-Nodes* que representan recursos no identificados por IRIs; el conjunto $P=\hat{I}$ y el conjunto $O = \hat{I} \cup \beta \cup \mathcal{L}$, donde \mathcal{L} es el

¹ <https://www.w3.org/RDF/>

conjunto de literales permitidos. Además de permitir el modelado de datos, RDF provee el lenguaje de consultas *SPARQL*².

Al igual que los grafos clásicos, los grafos RDF han tenido la necesidad de escalar incorporando la dimensión temporal, dando origen a los *RDF Temporales* [1].

El tránsito hacia los RDF Temporales ha abordado problemas similares al de los grafos clásicos hacia Grafos Temporales y muchos trabajos de ambas áreas, han analizado problemáticas equivalentes. Sin embargo, no se encuentran referencias cruzadas entre trabajos de sendos corpus de conocimiento.

Este trabajo realiza un análisis de modelos de referencia propuestos por diferentes autores para Grafos Temporales y para RDF Temporales y los pone en común, clasificándolos según las estrategias de modelado, con el objetivo de aportar una herramienta que oriente la tarea de diseño sobre grafos con temporalidad. Adicionalmente, considerando la tendencia que han seguido las bases de datos orientadas a grafos, se enfoca específicamente en RDF, con el objetivo de generar una aplicación concreta de implementación de RDF Temporal con incorporación de semántica. La misma, se aplica sobre un conjunto de datos abiertos enlazados denominado *BiGe-Onto*³, desarrollado por el Centro Científico Tecnológico CONICET-CENPAT⁴. Este desarrollo extiende el modelo existente con entidades y propiedades temporales basadas en la ontología OWL-Time, estándar de W3C, la cual incorpora nuevas capacidades de descubrimiento de información relacionada con el tiempo.

El resto del documento está estructurado de la siguiente manera: la Sección 2 clasifica trabajos de referencia de Grafos Temporales y RDF Temporal de acuerdo a sus estrategias de modelado. En la Sección 3, se orienta especialmente a las posibilidades de RDF para proveer semántica temporal sobre los datos y presenta una ontología de uso en la comunidad. La Sección 4 implementa dicha ontología sobre un caso real de un repositorio de Datos Abiertos Enlazados registrados por CONICET-CENPAT y muestra un ejemplo de consulta con semántica temporal. Finalmente, la Sección 5 presenta las conclusiones y trabajos futuros.

2. Estrategias de modelado de la dimensión temporal

En teoría y modelado de Grafos Temporales y RDF Temporales, se han desarrollado muchas propuestas, que varían de acuerdo a las características del problema a resolver, pero que se encuadran en dos estrategias principales: *versionado (snapshots)* o *etiquetado (timestamp)*. A continuación se describe cada una de ellas y posteriormente se identifican trabajos de referencia de diferentes autores y se los clasifica de acuerdo a la

²Protocol and RDF Query Language (SPARQL) <https://www.w3.org/TR/rdf-sparql-query/>

³ *BiGe-Onto*: <http://www.w3id.org/cenpat-gilia/bigeonto>

⁴Centro Científico Tecnológico CENPAT Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET) - Puerto Madryn - Argentina <http://www.cenpat-conicet.gob.ar/>

estrategia de modelado utilizada, confiando que esta organización será orientadora para la tarea de resolución de problemas particulares sobre grafos con temporalidad.

a) *Versionado*: Es un modelo basado en secuencia de *snapshots* que reflejan el estado del grafo en instantes precisos del tiempo. El modelo define $G_t=(V_t, E_t)$ como el conjunto de arcos y nodos vigentes en el instante t , como se muestra en Fig. 1. De esta manera, el grafo subyacente se obtiene como: $G = G_1 \cup G_2 \cup \dots \cup G_n$.

Se denomina $\Delta t_{i,i+1}$ al período de tiempo entre el G_i y G_{i+1} . El modelo supone que en esos períodos no hay cambios en el grafo o bien, son despreciables.

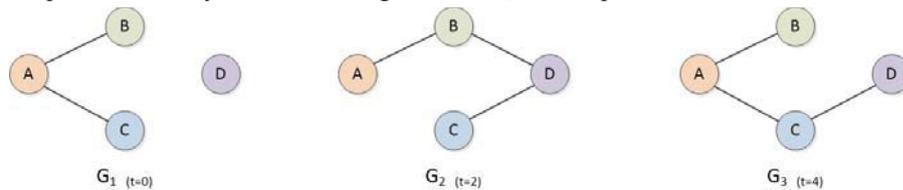


Figura 1: Grafo con temporalidad aplicando el mecanismo de *versionado*.

Este tipo de modelo es apropiado en sistemas con naturaleza de cambio periódico, en los cuales lo más habitual es trabajar sobre el snapshot más reciente, o bien sobre una ventana de tiempo de unos pocos snapshots, siendo eventual la necesidad de acudir a snapshots lejanos en el pasado.

b) *Etiquetado*: Los modelos de versionados no son adecuados cuando son necesarias evaluaciones históricas sobre toda la línea de tiempo, por ejemplo “¿Cuántas veces y durante cuánto tiempo estuvieron conectados el objeto x y el objeto y en el sistema?”. Este tipo de problemas requieren tener presente el grafo subyacente con todos los intervalos de tiempo en los que los arcos y los nodos estuvieron (o estarán) vigentes en el sistema. Para estos casos, los trabajos analizados proponen grafos *etiquetados*. Un grafo etiquetado se define como $G=(V, E, \mathcal{L})$, donde \mathcal{L} es el conjunto de etiquetas. En particular, en un grafo con tiempo, llamaremos \mathcal{LT} al conjunto de etiquetas que rotulan una referencia o restricción temporal (instante, intervalo o duración). De esta forma, el conjunto $E \subseteq (V \times V \times \mathcal{LT})$ y $V \subseteq (V \times \mathcal{LT})$. Dentro de estos modelos se detectan dos mecanismos principales: Etiquetado para definir *secuencias de contactos* entre nodos y Etiquetado para definir *intervalos de validez* de arcos y nodos.

b.1) *Etiquetado para secuencia de contactos*: Los arcos del grafo temporal se definen como tripletas $e_{ij}(v_i, v_j, t)$ la cual denota que el contacto entre el nodo v_i y el nodo v_j se realizó en el instante t . Como lo muestra la Fig. 2.a).

Este tipo de modelo es apropiado en casos en los que solo importa reflejar el instante de contacto entre nodos, aplicable por ej. en comunicaciones o cuando se necesario representar series de tiempo.

b.2) *Etiquetado para Intervalos de validez*: Los arcos del grafo temporal se definen como tripletas $e_{ij}(v_i, v_j, [t_s, t_e))$ la cual denota que el arco entre el nodo v_i y el nodo v_j tiene vigencia sólo en el intervalo $[t_s, t_e)$ donde t_s es el instante de inicio y t_e es el fin abierto, dado que en ese instante comienza un nuevo intervalo de validez. Ver Fig. 2.b).



Figura 2: a) Etiquetado con secuencia de contactos. b) Etiquetado con Intervalos de validez.

2.1. Modelos de referencia para Grafos Temporales

Entre los modelos de referencia que han propuesto mecanismo de *versionado* podemos citar a [7] donde además se definen cálculos de métricas temporales sobre grafos, como el *camino temporal* entre dos nodos. $Wt_{[k,k+L]}(i,j)$ es el camino entre i y j en el período definido por los snapshots $(k,k+L)$, considerando que $Wt_k(v_1,v_2)$ es el camino entre los nodos v_1 y v_2 en el snapshot G_{t_k} , el camino temporal entre i y j se define como $Wt_k(i,x_1), Wt_{k+1}(x_1,x_2), \dots, Wt_{k+L}(x_n,j)$.

En [8] se propone un mecanismo de *versionado* para modelar la actividad de la red neuronal del cerebro y propone una implementación basada en matrices de contacto y matrices de distancia para cada snapshot G_r . Por otra parte en [9] se propone el modelado con versiones en donde suma arcos de *espera* entre los nodos de diferentes versiones y define métricas.

Entre los modelos de referencia que han propuesto mecanismos de *etiquetado* está [10] donde se presenta un modelo de *secuencia de contactos* en el cual los arcos del grafo temporal se definen como tripletas $e_{ij}(v_i, v_j, t)$ que indican que el contacto entre el nodo v_i y el nodo v_j se realizó en el instante t . En [11] se presenta un modelo basado en *intervalos de validez*, donde la función *presencia* (ρ) puede ser aplicada tanto a arcos como a nodos y se trata de una función binaria, que retorna 1 si un determinado arco está presente en un determinado momento del tiempo y una función de latencia (ζ) que indica el tiempo que permanecen conectados. Considerando T como el tiempo de vida del sistema, define el grafo temporal G como: $G = (V, E, T, \rho, \zeta)$, donde la función *presencia* sobre un determinado arco e será verdadera en $[t, t+\zeta(e)]$.

2.2. Modelos de referencia para RDF Temporal

Dentro de los trabajos mayormente citados en RDF Temporal podemos mencionar [1] y [12], quienes han desarrollado modelos de *etiquetado*, estos definen la problemática del tiempo en RDF y proponen un modelo de tripletas $(s,p,o)[t]$ donde t es un *timestamp*. En [13] extienden su propuesta a tripletas $(s,p,o)[i]$ donde i es un *intervalo de validez* y definen relaciones básicas entre intervalos de tiempo como *meets*, *before*, *overlaps*, etc, que permiten realizar inferencia temporal. En [14] se propone un mecanismo para optimizar consultas con SPARQL sobre un modelo de *versionado*

temporal. Un abordaje similar se desarrolla en [15] con el objetivo de optimizar consultas y almacenamiento. En [16] los autores proponen un mecanismo de *etiquetado de intervalos de validez* de los arcos, mediante tripletas $(s,p:a,o)$ donde $a \in A$ es el conjunto de todos los intervalos de tiempo $[t_s, t_e]$. Los autores definen la *transitividad temporal* y algoritmos con evaluaciones experimentales.

Hay trabajos planteados para aplicaciones concretas, por ejemplo en [17] con un *modelo de secuencia de contactos* aplicado al streaming de lecturas de sensores, como series de tiempo. En este trabajo asignan un timestamp a cada frame del streaming $r[t]$, donde $t \in T$ es un espacio de tiempo discreto. Otro caso aplicado es el de [18], un *modelo de intervalos de validez* sobre una base de datos histórica de empleados, con entidades temporales sobre las que se definen consultas SPARQL y se aplican filtros por solapamiento de intervalos de tiempo de validez.

La clasificación de trabajos que se ha realizado en esta sección permite orientar la tarea de identificar la estrategia de modelado temporal más conveniente al momento de resolver un problema concreto, tanto sobre Grafos Temporales como RDF Temporal. Para el caso de uso que desarrolla este trabajo en la Sección 4, se ha utilizado un *modelo de etiquetado de intervalos de validez y secuencias de contacto* sobre una base de datos RDF.

3. Grafos RDF y semántica temporal en los datos

En sentido amplio, RDF es una herramienta conceptual que permite modelado de datos y metadatos en la web. RDF no es un grafo clásico, sino un hipergrafo dirigido, dado que sus arcos (s,p,o) pueden ser ternarios, permitiendo que el predicado (p) de una tripleta puede ser sujeto u objeto en otra, como es el caso del *SubPropertyOf*⁵ de la cual se muestra su uso en el caso de uso de la Fig. 3.

Un modelo de datos implementado en RDF, contiene al esquema y a las instancias de datos en el mismo grafo. Esto es posible mediante el uso del RDF Schema (*RDFS*), que permite definir el esquema de los datos en base a jerarquías de Clases/Subclases y Propiedades/Subpropiedades. Este andamiaje permite extender los modelos incorporando semántica sobre los datos y definir ontologías.

Una ontología [19] es un conjunto de conceptos relacionados que da significado a un hecho o contexto de la vida real. En el caso particular de bases de datos temporales, es propio hablar de una ontología de conceptos temporales que defina propiedades de los recursos que dependen del tiempo. Un ejemplo es *OWL-Time*⁶ definida por la W3C, la cual provee un amplio vocabulario que permite expresar hechos basados en secuencias de instantes, intervalos o duraciones. Esta ontología, además define propiedades que describen relaciones entre intervalos (*overlaps*, *meets*, *before*, *after*, etc.), duraciones, calendarios y diferentes granularidades y descripciones de tiempo. Esta forma de

⁵ Sub-Property: https://www.w3.org/TR/rdf-schema/#ch_subpropertyof

⁶ OWL-Time: <https://www.w3.org/TR/owl-time/>

representar el conocimiento agrega la posibilidad de definir una lógica temporal para luego realizar inferencias [20] y manejar información con cierto grado de incertidumbre, por ejemplo, intervalos o periodos de tiempo de los cuales se desconocen las duraciones exactas o los instantes concretos de inicio y fin.

4. Una Aplicación sobre Datos Abiertos Enlazados

En esta sección se presenta un caso de uso que reúne ideas vertidas en este trabajo y muestra la implementación de una ontología temporal basada en OWL-Time. La experiencia se aplica sobre una base de datos espacio-temporal real con 190 mil tripletas RDF, que registra ocurrencias de observaciones de peces recolectadas en campañas exploratorias sobre el Atlántico Sur Occidental por investigadores de CONICET-CENPAT y almacenadas en un triple-store RDF sobre *GraphDB*⁷.

Este repositorio forma parte del Sistema Nacional de Datos del Mar, dentro del programa de Grandes Instrumentos y Bases de Datos de Argentina y fue diseñado para publicar Datos Abiertos Enlazados (*LOD*) con el objetivo de ofrecer acceso abierto a los datos primarios de investigación. Los LOD [6] son un camino estándar hacia la integración de datos abiertos heterogéneos y de diferentes dominios [21]. Están basados en RDF y permiten interconectar datos en la web, pues son comprensibles por las máquinas, autodescriptos y con significado explícitamente definido.

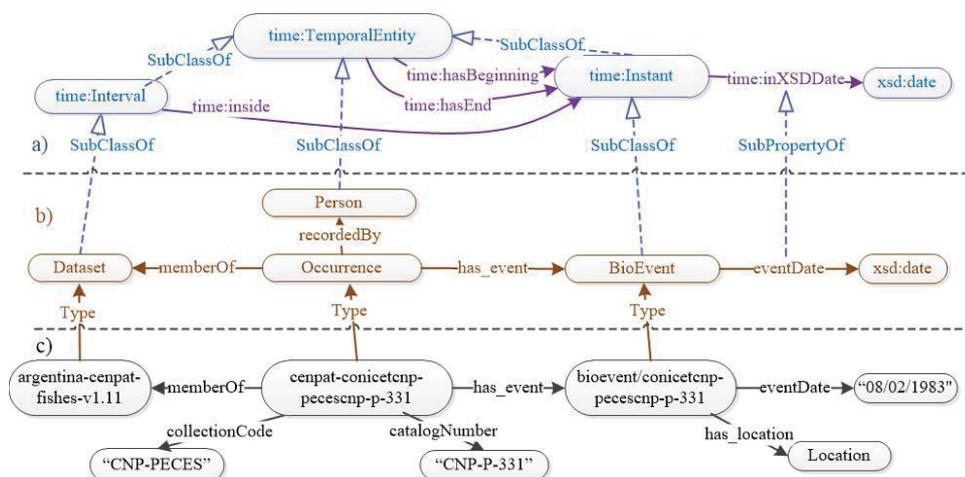


Figura 3: a) Implementación de OWL-Time para extender *BiGe-Onto*. b) Fragmento de la Ontología *BiGe-Onto* actual. c) Instancia actual de observaciones en tripletas RDF.

⁷ GraphDB: <http://graphdb.ontotext.com/>

El modelo sobre el que se realizó la experiencia responde a la ontología *BiGe-Onto* en la que se definen ocurrencias (*Occurrences*) de observaciones de peces recolectadas por un investigador (*Person*) y catalogadas en colecciones (*Dataset*). Cada evento de observación (*BioEvent*) se realiza sobre un determinado punto geográfico (*Location*) en una fecha determinada. En la *Fig. 3.b*) se muestran algunas de las clases *BiGe-Onto* y en la *Fig 3.c*) se muestra un ejemplo de la instancia de base de datos RDF, que en el repositorio utilizado cuenta con 5426 observaciones de peces.

En este trabajo, se incorporó temporalidad a dos entidades del modelo: *Person* y *Dataset* en base a clases y propiedades tomadas de OWL-Time, como se muestra en la *Fig. 3 a)*, generalizando también la entidad *BioEvent*, la cual ya tenía características temporales. Es importante destacar que esta extensión no resultó “traumática” en términos de reingeniería de modelo y ha aportado potencialidades de análisis temporal, como se muestra al final de esta sección.

A continuación se muestran las extensiones realizadas sobre el modelo actual:

- a) Se implementan las clases *TemporalEntity*, *Instant* e *Interval* y las propiedades *hasBeginning*, *hasEnd*, *inside* e *inXSDDate*, de acuerdo a la definición *OWL-Time*⁸.
- b) Se extiende a *Person* como una entidad temporal (*TemporalEntity*), utilizando el mecanismo de *etiquetado de intervalo de validez*. Esto permite establecer el período de permanencia de cada investigador dentro del sistema. Registrando su fecha de ingreso (*hasBeginning*) y de egreso (*hasEnd*). De la siguiente manera:

```
foaf:Person rdf:type owl:Class rdfs:subClassOf time:TemporalEntity
```

- c) Se extiende a *Dataset* como una entidad tipo *Interval*. Esto permite conocer el intervalo de tiempo que abarca cada colección. Si bien se aplica el mecanismo de *etiquetado de intervalos de validez*, tiene una característica especial, el dataset no incluye intervalo propio con fecha de inicio y de fin claros, sino que se define dinámicamente, a medida que se incorporan observaciones al dataset. La ontología permite definir este tipo de intervalos como una secuencia de instantes (*time:inside*).

```
void:Dataset rdf:type owl:Class rdfs:subClassOf time:Interval
```

- d) Se generaliza *BioEvent* y su propiedad *eventDate* como *Instant*. Esto no extiende funcionalidad pero incorpora a los eventos de observaciones dentro de la ontología. El mecanismo que se aplica es *etiquetado de secuencia de contactos*

```
bigeonto:BioEvent rdf:type owl:Class rdfs:subClassOf time:Instant;
                  rdfs:subClassOf dwc:Event.
dwc:eventDate rdf:type owl:DatatypeProperty;
              rdfs:subPropertyOf time:inXSDDate;
              rdfs:domain bigeonto:BioEvent rdfs:range xsd:dateTime
```

Para mostrar un resultado con la ontología implementada, se plantea la siguiente consulta: “*Qué hechos sucedieron entre 1957 y 1966?*”. La consulta en SPARQL es:

⁸ Términos del Namespace *time*: en OWL-Time <https://www.w3.org/2006/time>

```

SELECT (COUNT(?s) as ?sucesos) ?entidad ?propiedad
WHERE {
  ?o a time:Instant.
  ?s ?propiedad ?o .
  ?s a ?entidad .
  ?entidad rdfs:subClassOf time:TemporalEntity .
  ?o time:inXSDDate ?date.
  BIND (substr(xsd:string(?date),1,4) as ?daten) .
  FILTER(?daten >= "1957" && ?daten <= "1966") }
GROUP BY ?entidad ?propiedad

```

El resultado arrojado es “188 observaciones de peces, 53 registros en Datasets y 2 ingresos de nuevos científicos investigadores al staff”. Esta consulta se puede ejecutar accediendo desde la interfaz de *GraphDB* mediante el siguiente link⁹, con las credenciales: `usr:guest pass:cd.lod` y seleccionando el repositorio “*BiGe-Test*” desde el menú “*choose repository*”.

De esta manera se demuestra la utilidad de la aplicación de la ontología y las capacidades de consulta semántica. Esta característica es sumamente importante en áreas de estudio como la biodiversidad dado que ayuda a los investigadores a comprender fenómenos de conservación, como la distribución de especies en periodos de tiempo.

5. Conclusiones

La mayoría de los problemas pueden modelarse con grafos y entre ellos los que requieren contemplar la dimensión temporal, como es el caso de las bases de datos temporales. Hay destacados trabajos de referencia en el área de *Grafos Temporales* y en el área de *RDF Temporal*. Este trabajo muestra que la problemática de incorporar la dimensión temporal ha sido abordada con estrategias comparables en ambas áreas y aporta una clasificación de estrategias de modelado mayormente utilizadas y usos sugeridos, como soporte a la resolución de problemas de grafos con temporalidad.

Teniendo en cuenta que la tendencia de las bases de datos de grafos se inclina a grafos RDF, este trabajo profundiza sobre sus ventajas para la incorporación de semántica y contribuye con un aporte aplicado sobre un caso real, en un repositorio de *Datos Abiertos Enlazados* del Sistema Nacional de Datos del Mar. Este desarrollo ha permitido mostrar que identificando las entidades temporales del modelo es posible extenderlo, sin necesidad de una reingeniería costosa y que los resultados obtenidos aportan al descubrimiento de información por parte de los investigadores que estudian fenómenos de la biodiversidad en una línea de tiempo.

Los trabajos futuros se orientarán, en lo que refiere a teoría de grafos, a analizar un posible homomorfismo entre Grafos Temporales y RDF Temporal y en cuanto a desarrollo con ontologías de tiempo, a incorporar descripciones cualitativas sobre la información temporal para luego aplicar reglas de inferencia, como así también otros elementos, que permitan el razonamiento temporal sobre el modelo.

⁹ Consulta SPARQL: <http://web.cenpat-conicet.gob.ar:7200/sparql?savedQueryName=sucesos-1966&execute>

6. Referencias

- [1] C. Gutierrez, C. Hurtado, and A. Vaisman, “Temporal RDF,” *Lecture Notes in Computer Science*. pp. 93–107, 2005.
- [2] C. J. Date, H. Darwen, and N. Lorentzos, *Time and Relational Theory: Temporal Databases in the Relational Model and SQL*. Morgan Kaufmann, 2014.
- [3] R. Angles and C. Gutierrez, “Survey of graph database models,” *ACM Computing Surveys*, vol. 40, no. 1. pp. 1–39, 2008.
- [4] T. Berners-Lee, J. Hendler, and O. Lassila, “The Semantic Web,” *Scientific American*, vol. 284, no. 5. pp. 34–43, 2001.
- [5] C. Lozares, “La teoría de redes sociales,” *Papers. Revista de Sociología*, vol. 48. p. 103, 1996.
- [6] T. Heath and C. Bizer, *Linked Data: Evolving the Web Into a Global Data Space*. Morgan & Claypool Publishers, 2011.
- [7] V. Nicosia, J. Tang, C. Mascolo, M. Musolesi, G. Russo, and V. Latora, “Graph Metrics for Temporal Networks,” *Understanding Complex Systems*. pp. 15–40, 2013.
- [8] M. J. Williams and M. Musolesi, “Spatio-temporal networks: reachability, centrality and robustness,” *R Soc Open Sci*, vol. 3, no. 6, p. 160196, Jun. 2016.
- [9] V. Kostakos, “Temporal graphs,” *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, vol. 388, no. 6. pp. 1007–1023, 2009.
- [10] P. Holme and J. Saramäki, “Temporal Networks as a Modeling Framework,” *Understanding Complex Systems*. pp. 1–14, 2013.
- [11] A. Casteigts, P. Flocchini, W. Quattrociocchi, and N. Santoro, “Time-Varying Graphs and Dynamic Networks,” *Ad-hoc, Mobile, and Wireless Networks*. pp. 346–359, 2011.
- [12] C. Gutierrez, C. Hurtado, and A. Vaisman, “Introducing Time into RDF,” *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, vol. 19, no. 2. pp. 207–218, 2007.
- [13] C. Hurtado and A. Vaisman, “Reasoning with Temporal Constraints in RDF,” *Principles and Practice of Semantic Web Reasoning*. pp. 164–178, 2006.
- [14] J. Tappolet and A. Bernstein, “Applied Temporal RDF: Efficient Temporal Querying of RDF Data with SPARQL,” *Lecture Notes in Computer Science*. pp. 308–322, 2009.
- [15] J. D. Fernández, J. Umbrich, A. Polleres, and M. Knuth, “Evaluating Query and Storage Strategies for RDF Archives,” *Proceedings of the 12th International Conference on Semantic Systems - SEMANTiCS 2016*. 2016.
- [16] O. Udrea, D. R. Recupero, and V. S. Subrahmanian, “Annotated RDF,” *ACM Transactions on Computational Logic*, vol. 11, no. 2. pp. 1–41, 2010.
- [17] A. Rodriguez, R. McGrath, Y. Liu and J. Myers, “Semantic management of streaming data,” *Proceedings of the 2nd International Conference on Semantic Sensor Networks*, vol. 522, no. CEUR-WS. org, pp. 80–95, 2009.
- [18] Mcbride and Butler, “Representing and querying historical information in RDF with application to E-discovery,” *HP Laboratories Technical Report*. 2009.
- [19] T. Gruber, “Ontology,” in *Encyclopedia of Database Systems*, L. Liu and M. T. Özsu, Eds. Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 1963–1965.
- [20] S. Batsakis, E. Petrakis, I. Tachmazidis, and G. Antoniou, “Temporal representation and reasoning in OWL 2,” *Semantic Web*, vol. 8, no. IOS Press, pp. 981–1000, 2017.
- [21] K. Janowicz, P. Hitzler, B. Adams, D. Kolas, I. I. Vardeman, and Others, “Five stars of linked data vocabulary use,” *Semantic Web*, vol. 5, no. 3, pp. 173–176, 2014.