

# **Una Arquitectura Basada en Ontologías para Anotación Semántica de Imágenes en el Dominio de la Biomedicina**

**H. Andrés Melgar S.**

*Sección de Ingeniería Informática, Departamento de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica del Perú*

*Programa de Pos-Graduación en Ingeniería y Gestión del Conocimiento (EGC),  
Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil*

**Roberto C.S. Pacheco**

*Programa de Pos-Graduación en Ingeniería y Gestión del Conocimiento (EGC),  
Universidad Federal de Santa Catarina, Brasil*

## **Resumen**

*Con el objetivo de ayudar a los usuarios a traducir sus necesidades de información en estrategias efectivas de búsquedas, es propuesta una arquitectura que soporta el proceso de anotación semántica de imágenes en el dominio médico usando múltiples fuentes de información, pudiendo estas ser ontologías, taxonomías, vocabularios controlados y metatesauros. La arquitectura propuesta se basa en el uso de dos ontologías, una para describir el contenido de la imagen y sus respectivas regiones y otra para mapear las descripciones de cada imagen con los conceptos que se encuentran en las diversas fuentes de información. Este mapeamiento permite enriquecer la imagen con contenido semántico posibilitando la interpretación, por parte del computador, de los conceptos representados en cada región. La idea es que el usuario al seleccionar una región de la imagen, se extraiga una lista de términos para usarse como consulta en sistemas de recuperación de información. El uso de ontologías permite extender esta consulta usando diversos tipos de relaciones como por ejemplo sinónimos, nombres escritos en otros idiomas, enfermedades relacionadas, síntomas, tratamientos, entre otros.*

## **Palabras Clave**

Web semántica, ontologías, anotación semántica de imágenes, FMA, UMLS, DO

## **Introducción**

En el dominio médico y biomédico es de suma importancia acompañar las investigaciones que están siendo realizadas. Todos los días nuevos tratamientos, nuevas drogas e inclusive nuevas enfermedades son informados a la comunidad científica, y diseminados a través de diversos medios tanto físicos como electrónicos. Debido a las grandes cantidades de información, la recuperación de conocimiento se tornó una tarea desafiante debido a que los profesionales en el área no pueden acompañar el ritmo de crecimiento de las principales fuentes de información, precisando de herramientas que los apoyen en estos procesos.

Diversas propuestas han sido elaboradas para tentar resolver algunos de estos problemas, de esta forma la recuperación de información ayuda en el proceso de búsqueda de documentos y la extracción de información ayuda en el reconocimiento de bio-entidades. Por otro lado, muchas de estas propuestas no han sido enfocadas desde el lado del usuario ayudándolo en la elaboración de consultas, por lo que generalmente estos deben poseer cierto conocimiento sobre diversas nomenclaturas, ontologías y vocabularios controlados.

Esto hecho motivó a proponer una arquitectura que permita anotar imágenes con el objetivo de usarla como medio para realizar consultas sobre repositorios de información. Un

ejemplo de aplicación de esta arquitectura es presentado usando la FMA (*Foundational Model of Anatomy*), la UMLS (*Unified Medical Language System*) y la DO (*Disease Ontology*) como fuentes de información. Fue usada una ontología para anotar las descripciones de las imágenes y sus regiones lo que permite realizar consultas usando las diversas terminologías posibilitando así la recuperación de información usando los sinónimos de conceptos en diversos idiomas y las relaciones definidas para cada concepto. También es posible expandir la consulta para inferir términos relevantes al concepto como por ejemplo enfermedades relacionadas a los conceptos anatómicos, síntomas de las enfermedades, tratamientos, entre otros.

Este artículo está organizado de la siguiente manera. En la primera sección se presenta la introducción. La motivación es presentada en la sección 2. Una breve revisión de la literatura sobre anotación de imágenes es presentada en la sección 3. La arquitectura es propuesta en la sección 4 y en la sección 5 es presentado un ejemplo de aplicación de la arquitectura en el campo de la medicina. Finalmente en la sección 6 son presentadas las conclusiones.

### **Motivación**

En el área de la salud, poseer información apropiada en el momento oportuno es sumamente crítico, las decisiones no pueden ser postergadas y los profesionales de la salud deben estar hábiles para responder rápidamente una serie de cuestiones [1], pero el entendimiento científico en esta área ha aumentado considerablemente en los últimos años produciendo una serie de problemas en la gestión del conocimiento médico. Se encuentra ahora a disposición avalanchas de informaciones que relatan la existencia de nuevas drogas, nuevos procedimientos clínicos, nuevas técnicas biomédicas e inclusive nuevas enfermedades [2].

Debido a esto, la diseminación de conocimiento relevante para los intereses de la comunidad médica e biomédica se tornó una tarea compleja y consumidora de tiempo, envolviendo la identificación de la literatura pertinente y la lectura de un gran número de artículos [3, 4], delante de esto, descubrimientos científicos relevantes o asociaciones entre conceptos claves permanecen imperceptibles dentro de montañas de textos [5]. Por otro lado, especialistas en trabajo clínico frecuentemente tienen dificultades traduciendo sus necesidades de información en estrategias efectivas de búsquedas a fin de encontrar respuestas apropiadas, afectando su habilidad en la toma de decisiones [6].

Es delante de este escenario que nace la pregunta que motiva este trabajo **¿De que forma puede facilitarse la recuperación de información en el dominio de la medicina?** Muchas propuestas basadas en tecnologías de la Web Semántica han sido desarrolladas para anotar los documentos existentes en los repositorios de información y optimizar los procesos de recuperación, pero la mayoría de estas propuestas se enfocan en los mecanismos de recuperación (*i.e.*, mejorar los niveles de *recall* y precisión) y no en facilitar la creación de consultas por parte de los usuarios finales.

Por otro lado, el uso de imágenes que contienen representaciones del mundo real, que *a priori* son conocidas por los usuarios y hacen parte de su visión de mundo, permite que el conocimiento divulgado a través de estas imágenes pueda ser fácilmente relacionado con los conocimientos previos de los individuos, facilitando el aprendizaje y la memoria [7, 8].

Imágenes con estas características pueden ser usadas como medio para recuperación de información. La idea es que el usuario no digite los términos o palabras claves para realizar una consulta sino que al seleccionar una región de una imagen sean recuperados los documentos relacionados con el concepto representado por dicha región. En este sentido se propone una arquitectura basada en ontologías para la anotación semántica de imágenes que tiene por objetivo final facilitar el proceso de recuperación de información.

Muchas propuestas han sido desarrolladas para anotar imágenes con el objetivo de facilitar su recuperación, esta propuesta difiere en el objetivo de la anotación. Las anotaciones realizadas en esta arquitectura tienen por objetivo facilitar la creación de consulta a los usuarios para invocar a motores de recuperación de información y no la recuperación de imágenes propiamente dicha.

### Revisión de la Literatura

Los metadatos asociados a las imágenes pueden ser clasificados como [9]: i) **metadatos con contenido independiente**, cuando los metadatos se encuentran relacionados a la imagen pero no la describen, por ejemplo: nombre y apellidos de los autores, fechas, localización, etc. ii) **metadatos con contenido dependiente**, cuando los metadatos se refieren a características de bajo nivel y/o nivel intermedio, por ejemplo: color, textura, forma, etc. iii) **metadatos con contenido descriptivo**, cuando los metadatos se refieren a contenido semántico. Tiene que ver con las relaciones de las entidades de la imagen con las entidades del mundo real.

Los metadatos con contenido descriptivo pueden ser especificados usando uno o más de los siguientes enfoques [9-12]: i) **descripciones usando texto libre**, cuando ninguna estructura predefinida para la anotación es proporcionada, ii) **clasificación usando palabras claves**, cuando palabras claves seleccionadas de forma arbitraria o elegidas a partir de vocabularios controlados son usadas para describir las imágenes; iii) **clasificaciones basadas en ontologías**, cuando conceptos o instancias de una ontología son utilizados para anotar las imágenes.

Por otro lado, los metadatos con contenido descriptivo pueden ser proporcionados a dos niveles de especificidad: i) contenido descriptivo asociado a la imagen completa [10, 13-16] y ii) la segmentación de la imagen con vinculación al contenido descriptivo en cada región segmentada [12, 17-27]. Para segmentar una imagen son usados formalismos que explícitamente definen las regiones que conforman la imagen (por ejemplo, *Image Markup Language*<sup>1</sup> [28] e *Image-Region Ontology*<sup>2</sup>).

Los sistemas para anotar imágenes usando metadatos con contenido descriptivo basadas en ontologías, por lo general usan dos tipos de ontologías, una para definir el esquema de anotación y otra para definir los conceptos del dominio. Esto permite que los esquemas de anotación sean definidos de forma independiente del dominio. La forma de definir la ontología de anotación varía dependiendo de los requerimientos de cada aplicación. Por ejemplo en [13] fue usada una estructura basada en cuatro elementos “agente - acción - objeto - escenario” para anotar imágenes de simios, en [14] un conjunto estructurado de

---

<sup>1</sup> <http://faculty.washington.edu/lober/iml/>

<sup>2</sup> <http://www.mindswap.org/2005/owl/digital-media>

propiedades de objetos fue usado para anotar imágenes de muebles antiguos. De forma similar en [15] se usaron los elementos “agente - acción - objeto - receptor” para anotar una colección de imágenes de arte y en [16] se usó la estructura “actor - acción - objeto” para anotar imágenes en el dominio de los deportes. En algunos casos la asociación de instancias de una ontología a la imagen es suficiente [10].

En algunas situaciones es necesario trabajar con más de una ontología de dominio. Esta situación se da cuando en un mismo dominio existen varias ontologías consolidadas (*i.e.*, *Foundational Model of Anatomy ontology* y *Disease Ontology* en el dominio de la medicina) o cuando la imagen anotada va a ser usada por un especialista en dominios diferentes. En este sentido en [22, 27] se propone una arquitectura para anotación de imágenes no dominio de la medicina. En esta arquitectura es posible usar ontologías clínicas para especificar las funciones de la práctica clínica y ontologías médicas que incluyen descripciones que van desde los síntomas de las enfermedades hasta descripciones abstractas de la anatomía humana y las relaciones abstractas entre entidades anatómicas. De forma similar en [12, 19-21] se presenta una propuesta genérica para anotar imágenes independientes del dominio, proporcionando mecanismos para catalogar todos los diferentes tipos de contenido de una imagen a través de distintas ontologías.

### Arquitectura Propuesta

Con el objetivo de anotar semánticamente imágenes y sus regiones, se propone en este artículo una arquitectura basada en ontologías. Esta arquitectura está conformada básicamente por tres elementos (ver imagen 1): i) una ontología para describir la imagen y las regiones de esta, ii) diversas fuentes de información (*i.e.*, ontologías, taxonomías, vocabularios controlados, tesauros, metatesauros, etc.) que servirán como referencia para anotar las imágenes, y iii) una ontología de anotación que permitirá mapear las descripciones de las imágenes con las diferentes fuentes de información.

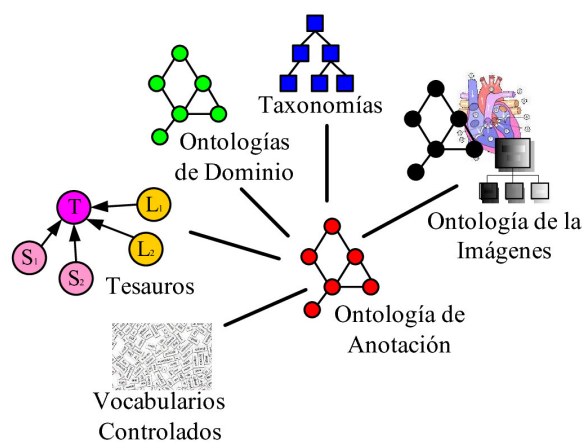


Figura 1: Arquitectura propuesta para la anotación de imágenes.

- **Ontología de las Imágenes**

El objetivo principal de esta ontología es describir el contenido de la imagen, explicitando las entidades existentes en cada una de las regiones que la conforman. En la figura 2 se puede apreciar las principales clases de esta ontología.

Las imágenes son representadas en la ontología mediante la clase `Imagen`. El nombre físico de la imagen, la fecha de creación y demás metadatos de contenido independiente son representados en la clase `Metadatos`. Las entidades existentes en cada imagen son representadas por regiones. Una región es definida mediante un conjunto de *píxeles* considerando que un *píxel* puede pertenecer únicamente a una región. Las regiones son representadas en la ontología como instancias de la clase `RegionImagen`. Para describir a las entidades de cada región son usadas anotaciones. Las anotaciones son definidas como una lista de conceptos escritos en algún idioma. Las anotaciones en las ontologías son definidas como instancias de la clase `Anotacion`.

Los conceptos, definidos como instancias de la clase `Concepto`, son descritos usando lenguaje natural. En esta ontología estos conceptos no se relacionan con los conceptos definidos en las fuentes de información. La idea es mantener la descripción de la imagen y la anotación semántica de la imagen en estructuras independientes, esto permite que una misma imagen pueda ser mapeada con diversas anotaciones siguiendo diferentes criterios.

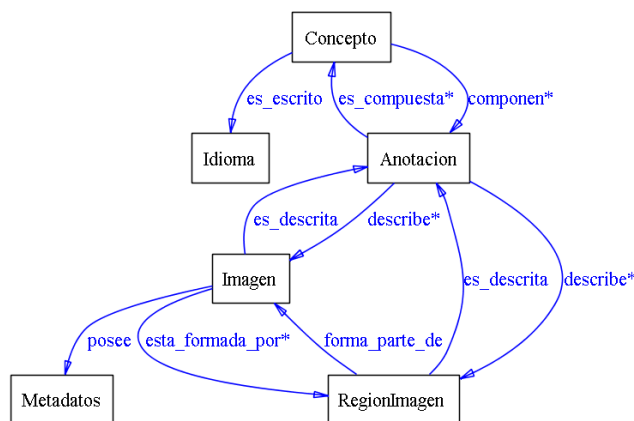


Figura 2: Ontología para describir a las imágenes

- **Fuentes de Información**

Las fuentes de información definen los elementos de información con los que las imágenes serán anotadas. Estas pueden ser de diversos tipos como vocabularios controlados, taxonomías, tesauros, metatesauros y ontologías. Dependiendo del tipo de fuente de información, el mapeamiento será realizado usando diferentes tipo de componentes, por ejemplo en caso sea usado una ontología, el mapeamiento podrá ser realizado usando una clase o una instancia, en caso sea usado un vocabulario controlado, el mapeamiento será realizado usando un término del vocabulario.

- **Ontología de Anotación**

El objetivo principal de esta ontología es permitir realizar la anotación semántica de la imagen. La anotación consiste en mapear cada concepto definido en la ontología de las imágenes con uno o más conceptos o términos definidos en las fuentes de información. En la figura 3 se pueden observar las principales clases de esta ontología.

Las diversas fuentes de información son definidas como instancias de la clase `FuenteInformacion`. Los elementos de información son representados como

instancias de la clase `ElementoInformacion`, en esta clase son representadas las referencias a los elementos de las fuentes (*i.e.*, URI de la clase o instancia, código del término, palabra clave o concepto).

El mapeamento es definido en la clase `Mapeamento` en base a las relaciones `map-de` y `map-para` que tienen como rango a la clase `ElementoInformacion`. La relación `map-de` usa como elementos de información instancias de la clase `Concepto` de la ontología de la imagen. Los tipos de información usados por la relación `map-para` dependerán del tipo de fuente pudiendo ser estas clases, instancias y/o conceptos. La clase `Relacion` permite identificar la relación que existen entre los elementos de información.

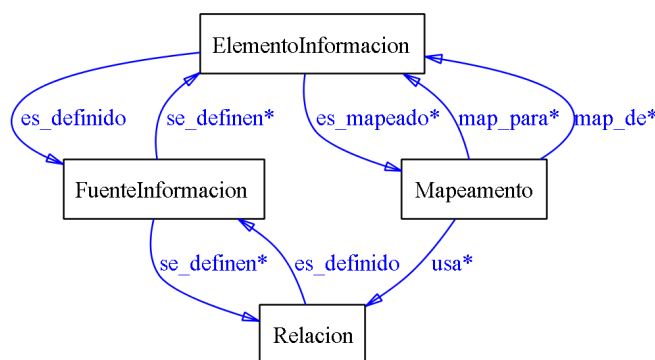


Figura 3: Ontología para anotar semánticamente las imágenes.

### Ejemplo de Aplicación

A continuación presentamos un ejemplo de aplicación usando la arquitectura propuesta para el dominio de la salud (ver imagen 4).

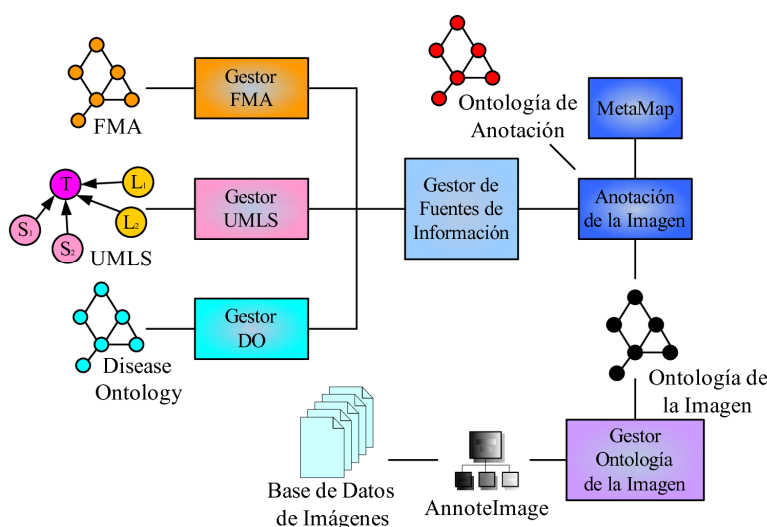


Figura 4: Ontología para anotar semánticamente las imágenes.

- **Gestor de Fuentes de Información**

El acceso a las fuentes de información se realiza a través del componente `Gestor de Fuentes de Información` que tiene como objetivo principal encapsular las estructuras y formatos de las diversas fuentes de información usadas. En este ejemplo de

aplicación se han utilizado tres fuentes de información diferentes: i) la FMA<sup>3</sup>, ii) La UMLS<sup>4</sup> y la DO<sup>5</sup>. La FMA es un modelo de referencia sobre la anatomía en el cual se encuentra representada de forma simbólica, la estructura organizacional del cuerpo humano desde el nivel macromolecular hasta el nivel macroscópico [29]. Esta ha sido concebida para ser usada en diferentes problemas que requieren conocimiento anatómico [30, 31]. La versión actual de la FMA contiene aproximadamente 75 000 clases que cubren cerca de 120 000 términos y 2 millones de instancias de relaciones.

La UMLS es un repositorio de vocabularios biomédicos que integran cerca de 2 millones de términos para aproximadamente 900 000 conceptos y 12 millones de instancias de relaciones. Entre las principales fuentes de información que integra se pueden mencionar: la taxonomía NCBI, la Gene Ontology, la taxonomía MeSH, la FMA, entre otras [32].

La DO es un subconjunto revisado manualmente de la UMLS enriquecido con conceptos que cubren varios tipos de enfermedades como tipos de cáncer, malformaciones congénitas, deformidades y trastornos mentales. [33].

Para cada fuente de información se ha definido un componente que permite realizar consultas e inferencias en las diversas fuentes de información. De esta forma el Gestor FMA permite acceder a la FMA, el Gestor UMLS permite acceder a la UMLS y el Gestor DO a la ontología DO. Estos gestores son usados únicamente por el componente Gestor de Fuentes de Información.

Dado que la FMA está implementada en *frames*, el Gestor FMA hace uso de la API de Protégé para recuperar las clases y sus propiedades (*i.e.*, clases *KnowledgeBase*, *Project*, *Frame*, *Slot*, entre otras). La UMLS, por otro lado, ha sido instalada en una base de datos MySQL, el Gestor UMLS hace uso de la tecnología JDBC para recuperar los elementos del metatesauro (*i.e.*, clases *Connection*, *PreparedStatement*, *ResultSet*, entre otras). En el caso de la DO, hemos usado la versión OWL de la ontología por lo que el Gestor DO ha sido implementado usando el paquete Jena (*i.e.*, clases *OntModel*, *OntClass*, *ObjectProperty*, *Individual*, entre otros).

- **Gestor Ontología de la Imagen**

El Gestor Ontología de la Imagen tiene como objetivo principal describir el contenido de las imágenes almacenadas en el banco de datos de imágenes. Estas descripciones son almacenadas como instancias en la Ontología de la Imagen. Para realizar la segmentación de la imagen fue utilizado AnnoteImage<sup>6</sup>, un software que permite anotar imágenes usando el lenguaje IML. Esta herramienta ha sido concebida para realizar anotaciones de las regiones descritas en imágenes GIF o JPEG [34].

AnnoteImage proporciona un XML donde las regiones segmentadas de la imagen son especificadas. Este XML es usado para recuperar las informaciones de las regiones y

---

<sup>3</sup> <http://sig.biostr.washington.edu/projects/fm/index.html>

<sup>4</sup> <http://www.nlm.nih.gov/research/umls/>

<sup>5</sup> <http://diseaseontology.sourceforge.net>

<sup>6</sup> <http://sig.biostr.washington.edu/projects/AnnoteImage/>

salvarlas como instancias en la Ontología de la Imagen. A continuación se presenta parte de un XML resultado de anotar la aorta en una imagen del corazón.

```
<Frame image="corazonPT.png"> <Colors
  outline_color="YELLOW" pin_color="YELLOW"
  string_color="YELLOW"/>
  <Region id="2" type="STRUCT">
    <label>aorta</label>
    <center>
      <pt x="290" y="205"/>
    </center>
    <outline>
      <pt x="248" y="307"/>
      <pt x="214" y="248"/>
      ...
      <pt x="265" y="197"/>
      <pt x="264" y="215"/>
    </outline>
  </Region>
```

- **Anotación de Imágenes**

El proceso de anotación de imágenes consisten en mapear las descripciones usadas para describir cada una de las regiones de las imágenes con los conceptos definidos en las fuentes de información. Para identificar los conceptos en la UMLS se usó MetaMap , un software que tiene por objetivo mapear textos biomédicos para reconocer entidades UMLS. Metamap utiliza un enfoque intensivo de conocimiento basado en el procesamiento simbólico, procesamiento de lenguaje natural y técnicas de lingüística computacional [35]. MetaMap retorna el código UMLS de las entidades reconocidas en los texto de entrada escritos en lenguaje natural. A continuación se presenta parte de XML de respuesta que contiene la identificación de la palabra *Heart*.

```
...
<Mapping>
  <MapNegScore>-1000</MapNegScore>
  <Candidates Count="1">
    <Candidate>
      <NegScore>-1000</NegScore>
      <UMLSCUI>C1281570</UMLSCUI>
      <UMLSConcept>Heart</UMLSConcept>
      <UMLSPreferred>
        Entire heart
      </UMLSPreferred>
      <MatchedWords Count="1">
        <MatchedWord>heart</MatchedWord>
      </MatchedWords>
    </Candidate>
  </Candidates>
</Mapping>
...
```

Con el código UMLS retornado por MetaMap y usando el Gestor de Fuentes de Información es posible recuperar los datos relacionados a aquel concepto. Por ejemplo para recuperar los diferentes nombres que asociados a un determinado concepto UMLS, el Gestor de Fuentes de Información invoca al Gestor UMLS quien ejecuta la siguiente consulta SQL.



```

select distinct
eCON.str, eCON.lat
from MRCONSO eCON
where CUI = "C0018787"

```

Parte de los resultados retornados por el Gestor UMLS se pueden visualizar en la tabla 1, en donde es posible identificar también el idioma en el cual está escrito el concepto. Esta lista de conceptos es usada para anotar la imagen.

Tabla 1: Lista de conceptos UMLS relacionados

Heart	ENG	Hearts	ENG
Cardiac	ENG	Cardiac structure	ENG
estructura cardíaca	ESP	estructura del corazon	ESP
corazon	ESP	Coração	POR

MetaMap trabaja con el metatesauro UMLS quien incorpora también un subconjunto de la FMA, de esta forma es posible también identificar los conceptos FMA usando MetaMap. Después de mapear los conceptos UMLS, estos son usados para encontrar las enfermedades relacionadas, usando la DO.

## Conclusión

Ha sido presentada una propuesta de arquitectura basada en ontologías que tiene por objetivo anotar imágenes y sus respectivas regiones usando múltiples fuentes de información. La finalidad de la anotación de la imagen es usar los conceptos vinculados a la regiones para crear consultas y ejecutarlas usando motores de recuperación de información. El uso de diversas fuentes de información permite expandir la consulta usando términos relacionados como por ejemplo sinónimos o nombres escritos en otros idiomas. También posible usar otros tipos de relaciones como por ejemplo enfermedades relacionadas al corazón.

Esta arquitectura ha sido pensada para ser usada en el dominio de la biomedicina y la salud, pero puede ser usada en otros dominios. La arquitectura propuesta es parte de una arquitectura que usa las imágenes no solo como medio para ejecución de consultas sino como medio para la diseminación de conocimiento.

En estos momentos estamos realizando un prototipo de esta arquitectura usando un subconjunto de artículos de la biblioteca electrónica SciELO<sup>7</sup> (*Scientific Electronic Library Online*) como repositorio de información y la FMA, UMLS y DO como fuentes de información usadas para anotar las imágenes y los artículos de la base Scielo.

Estamos pensando también extender la ontología de la imagen para permitir la descripción de imágenes almacenadas en *voxels*. Un *voxel* (**V**olumetric **piXEL**) representa un valor en una matriz regular en un espacio tridimensional. Este elemento es análogo al *pixel* que es usado para representar imágenes en dos dimensiones [36, 37].

## Referencias

<sup>7</sup> <http://www.scielo.com.br/>

- [1] D. Revere and S. Fuller, "Building a Customizable Knowledge Management Environment to Support Public Health Practice: Design Strategies," Hawaii International Conference on System Sciences, Proceedings of the 41st Annual, 2008.
- [2] M. Guah, "Today's health care demands knowledge management strategy," 26th International Conference on Information Technology Interfaces, vol. 1, pp. 461–467, June 2004.
- [3] P. Sondhi, P. Raj, V. Kumar, and A. Mittal, "Question Processing and Clustering in INDOC: A Biomedical Question Answering System," EURASIP Journal on Bioinformatics and Systems Biology, vol. 2007, no. 3, 2007.
- [4] T. Theodosiou, L. Angelis, and A. Vakali, "Non-linear correlation of content and metadata information extracted from biomedical article datasets," Journal of Biomedical Informatics, vol. 41, no. 1, pp. 202–216, 2008.
- [5] K. Seki and J. Mostafa, "Literature-based discovery by an enhanced information retrieval model," in Discovery Science, ser. Lecture Notes in Computer Science, V. Corruble, M. Takeda, and E. Suzuki, Eds., vol. 4755. Springer, 2007, pp. 185–196.
- [6] P. W. Hung, S. B. Johnson, D. R. Kaufman, and E. A. Mendonça, "A multi-level model of information seeking in the clinical domain," Journal of Biomedical Informatics, vol. 41, no. 2, pp. 357–370, 2008.
- [7] R. A. Burkhard, "Learning from architects: The difference between knowledge visualization and information visualization," Eighth International Conference on Information Visualisation (IV'04), pp. 519–524, 2004.
- [8] R. A. Burkhard, "Towards a framework and a model for knowledge visualization: synergies between information and knowledge visualization," in Knowledge and Information Visualization. Berlin/Heidelberg: Springer, 2005, vol. 3426, pp. 238–255.
- [9] A. Hanbury, "A survey of methods for image annotation," Journal of Visual Languages & Computing, vol. 19, no. 5, pp. 617–627, 2008.
- [10] E. Hyvönen and A. Styrman, "Ontology-based image retrieval," in Proceedings of the XML Finland 2002 Conference, E. Hyvönen and M. Klemettinen, Eds., 2002.
- [11] H. Müller, N. Michoux, D. Bandon, and A. Geissbuhler, "A review of content-based image retrieval systems in medical applications-clinical benefits and future directions," International Journal of Medical Informatics, vol. 73, no. 1, pp. 1–23, 2004.
- [12] C. Halaschek-Wiener, J. Golbeck, B. Parsia, J. Hendler, A. Schain, and M. Grove, "A flexible approach for managing digital images on the semantic web," in Proceedings of the 5th International Workshop on Knowledge Markup and Semantic Annotation, 2005.
- [13] A. T. Schreiber, B. Dubbeldam, J. Wielemaker, and B. Wielinga, "Ontology-based photo annotation," Intelligent Systems, IEEE, vol. 16, no. 3, pp. 66–74, 2001.
- [14] G. Schreiber, I. Blok, D. Carlier, W. van Gent, J. Hokstam, and U. Roos, "A mini-experiment in semantic annotation," in The Semantic Web - ISWC 2002, I. Horrocks and J. Hendler, Eds. Springer Berlin / Heidelberg, 2002, pp. 404–408.
- [15] L. Hollink, G. Schreiber, J. Wielemaker, and B. Wielinga, "Semantic annotation of image collections," in Proc. of the 4th Int'l. Workshop on Knowledge Markup and Semantic Annotation, ser. Knowledge Capture 2003, S. Handschuh, M. Koivunen, R. Dieng, and S. Staab, Eds., 2003.
- [16] T. Osman, D. Thakker, G. Schaefer, and P. Lakin, "An integrative semantic framework for image annotation and retrieval," in Proceedings of the IEEE/WIC/ACM International Conference on Web Intelligence. IEEE Computer Society, 2007, pp. 366–373.
- [17] C. Chronaki, X. Zabulis, and S. Orphanoudakis, "Ic2 net medical image annotation service," Informatics for Health and Social Care, vol. 22, no. 4, pp. 337–347, 1997.
- [18] P. Bottoni, R. Civica, S. Levaldi, L. Orso, E. Panizzi, and R. Trinchese, "Storing and retrieving multimedia web notes," in Databases in Networked Information Systems, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2005, vol. 3433, pp. 119–137.
- [19] C. Halaschek-Wiener, J. Golbeck, A. Schain, M. Grove, B. Parsia, and J. Hendler, "Photostuff—an image annotation tool for the semantic web," in Proceedings of the 4th International Semantic Web Conference, 2005.
- [20] C. Halaschek-Wiener, A. Schain, M. Grove, B. Parsia, and J. Hendler, "Management of digital images on the semantic web," in Proceedings of the 4th International Semantic Web Conference, 2005.
- [21] C. Halaschek-Wiener, J. Golbeck, A. Schain, M. Grove, B. Parsia, and J. Hendler, "Annotation and provenance tracking in semantic web photo libraries," in Provenance and Annotation of Data, ser. Lecture Notes in Computer Science. Springer Berlin / Heidelberg, 2006, vol. 4145, pp. 82–89.

- [22] M. Möller and M. Sintek, "A generic framework for semantic medical image retrieval," in KAMC, ser. CEUR Workshop Proceedings, T. Bürger, S. Dasiopoulou, C. Eckes, S. J. Perantonis, J. Pereira, and V. Tzouvaras, Eds., vol. 253. CEUR-WS.org, 2007.
- [23] D. Rubin, P. Mongkolwat, V. Kleper, K. Supekar, and D. Channin, "Medical imaging on the semantic web: Annotation and image markup," in AAI Spring Symposium - Technical Report SS-08-05, pp. 93-98, 2008.
- [24] D. Rubin, C. Rodriguez, P. Shah, and C. Beaulieu, "ipad: Semantic annotation and markup of radiological images," in AMIA Annu Symp Proc, vol. 2008. American Medical Informatics Association, 2008, pp. 626-630.
- [25] D. L. Rubin, P. Mongkolwat, V. Kleper, K. Supekar, and D. S. Channin, "Annotation and image markup: Accessing and interoperating with the semantic content in medical imaging," *Intelligent Systems, IEEE*, vol. 24, no. 1, pp. 57-65, 2009.
- [26] W. Hsu, S. Antani, L. R. Long, L. Neve, and G. R. Thoma, "Spirs: A web-based image retrieval system for large biomedical databases," *International Journal of Medical Informatics*, vol. 78, no. Supplement 1, pp. S13-S24, 2009.
- [27] D. Sonntag and M. Möller, "A multimodal dialogue mashup for medical image semantics," in *Proceeding of the 14th international conference on Intelligent user interfaces*. Hong Kong, China: ACM, 2010, pp. 381-384.
- [28] W. Lober, L. Trigg, D. Bliss, and J. Brinkley, "Iml: An image markup language," in *Proceedings, American Medical Informatics Association Fall Symposium*. American Medical Informatics Association, 2001, pp. 403-407.
- [29] C. Rosse, L. Shapiro, and J. Brinkley, "The Digital Anatomist Foundational Model: Principles for Defining and Structuring its Concept Domain," in *American Medical Informatics Association Fall Symposium, 1998*, pp. 820-824.
- [30] C. Rosse, J. Mejino, B. Modayur, R. Jakobovits, K. Hinshaw, and J. Brinkley, "Motivation and Organizational Principles for Anatomical Knowledge Representation," *Journal of the American Medical Informatics Association*, vol. 5, pp. 17-40, 1998.
- [31] C. Rosse and J. Mejino, "A reference ontology for biomedical informatics: the Foundational Model of Anatomy," *Journal of Biomedical Informatics*, vol. 36, no. 6, pp. 478-500, 2003.
- [32] O. Bodenreider, "The unified medical language system (umls): integrating biomedical terminology," *Nucleic Acids Research*, vol. 32, no. Database Issue, pp. 267-270, 2004.
- [33] J. Osborne, J. Flatow, M. Holko, S. Lin, W. Kibbe, L. Zhu, M. Danila, G. Feng, and R. Chisholm, "Annotating the human genome with disease ontology," *BMC Genomics*, vol. 10, no. Suppl 1, p. S6, 2009.
- [34] W. Lober and J. Brinkley, "A portable image annotation tool for web-based anatomy atlases," in *Proceedings, American Medical Informatics Association Fall Symposium*. American Medical Informatics Association, 1999, p. 1108.
- [35] A. Aronson, "Effective mapping of biomedical text to the UMLS Metathesaurus: the MetaMap program," in *Proceedings of the AMIA Symposium*. American Medical Informatics Association, 2001, pp. 17-21.
- [36] T. T. Elvins, "A survey of algorithms for volume visualization," *SIGGRAPH Comput. Graph.*, vol. 26, no. 3, pp. 194-201, 1992.
- [37] R. Gallagher, *Computer Visualization: graphics techniques for scientific and engineering analysis*. Boca Raton, FL: CRC Press, 1995.