

An ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management

Un enfoque basado en ontología para la gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra

Marta Gangoellells¹*, Miquel Casals*

* Universidad Politécnica de Cataluña. ESPAÑA

Fecha de Recepción:04/06/2012

Fecha de Aceptación:26/11/2012

PAG 103 - 127

Abstract

This paper presents an innovative approach to implementing integrated environmental and health and safety management systems in construction companies. It focuses on the sub-system for operational control of on-site environmental impacts and health and safety risks. The high compatibility between the operational control requirements that are stated in ISO 14001:2004 and OHSAS 18001:2007 and the demonstrated interactions between environmental impacts and health and safety risks (Gangoellells et al., 2009, Gangoellells et al., 2010) led us to develop a domain ontology to build an integrated knowledge model for operational control at construction sites. The ontology-based approach that we have developed is strongly influenced by the methodology provided by Noy and McGuinness (2001) and models the key concepts and their relations in the domain in a structured, extendable, flexible, reusable and shareable way. The ontology-based approach is implemented through Protégé 3.4 beta and properly evaluated by means of competency questions, internal verifications and expert validation interviews. This paper represents the first attempt at representing, sharing, reusing and managing the knowledge related to on-site integrated operational control of environmental and health and safety incidences and lays the ground for overcoming some barriers that contractors must face when they implement an integrated management system.

Keywords: Ontology, environmental impact, health and safety risk, integrated operational control, integrated management system, building, construction process

Resumen

Este artículo tiene como objetivo favorecer la implementación de sistemas integrados de gestión ambiental, de seguridad y salud en empresas constructoras, centrándose en el subsistema de control de los impactos ambientales y los riesgos de seguridad y salud en obra. La gran compatibilidad que presentan los requerimientos vinculados al control operacional establecidos en la normas ISO 14001:2004 y OHSAS 18001:2007 así como las interacciones existentes entre impactos ambientales y riesgos de seguridad y salud (Gangoellells et al., 2009, Gangoellells et al., 2010) han motivado el desarrollo de una ontología que permite construir un modelo integrado para el control operacional en obras de construcción. El enfoque desarrollado está fuertemente influenciado por la metodología de Noy y McGuinness (2001) y modela los conceptos clave y las relaciones del campo de forma estructurada, extensible, flexible, reutilizable y compartible. Este enfoque basado en ontologías ha sido implementado mediante Protégé 3.4 beta y correctamente evaluado utilizando preguntas de competencia, verificaciones internas y entrevistas de validación con expertos. Este artículo desarrolla el primer enfoque que permite representar, compartir, reutilizar y gestionar el conocimiento relacionado con el control operacional integrado en obra de las incidencias medioambientales, de seguridad y salud y sienta las bases para poder superar la mayoría de las barreras que las empresas constructoras deben afrontar durante el proceso de implementación de un sistema de gestión integrada.

Palabras Clave: Ontología, impacto ambiental, riesgo de seguridad y salud, control operacional integrado, sistema integrado de gestión, edificación, proceso constructivo.

1. Introducción

Muchas organizaciones han adoptado, o están en proceso de adoptar, sistemas formales de gestión basados en estándares tales como ISO 9001, ISO 14001 y OHSAS 18001. No obstante estos sistemas han sido ampliamente criticados por ser burocráticos, arduos, basados en la teoría, y cuyo valor es cuestionable para la gestión de la construcción (Griffith et al., 2000). Además la investigación ha demostrado que la implementación y operación de los estándares en paralelo, requieren de la ejecución de muchas tareas en forma repetida (Labodová, 2004;

1. Introduction

Many organizations have adopted or are adopting formal management systems based on standards such as ISO 9001, ISO 14001 and OHSAS 18001. However, these systems have been widely criticized for being bureaucratic, arduous, paper-driven and of questionable value to construction management (Griffith et al., 2000). In addition, research has demonstrated that the implementation and operation of the standards in parallel requires many duplicate management tasks (Labodová, 2004;

¹ Autor de correspondencia / Corresponding author:
E-mail: marta.gangoellells@upc.edu



Zeng et al., 2007). La dificultad de operar en paralelo y de forma simultánea más de un sistema de gestión (Zeng et al., 2007) y el aumento de la compatibilidad entre los diferentes estándares (Jørgensen et al., 2006) condujeron a la idea de la integración de operar en paralelo y de forma simultánea más de un sistema de gestión realizada para determinar los obstáculos más comunes encontrados por las organizaciones, durante la implementación de un sistema de gestión integrado, destacan la falta de orientación técnica (Zeng et al., 2007; Zeng et al., 2005; Zutshi, 2005; Salomone, 2008; Tam et al., 2008). De acuerdo con estudios empíricos descritos por diversos autores, un ámbito que conlleva un alto nivel de incertidumbre, durante la adopción de un sistema de gestión integrada, es la integración de elementos que corresponden a la identificación, evaluación y control de impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud (Salomone, 2008; Pheng y Shiu, 2000; Seiffert, 2008). Gangoellés et al. (2009), Gangoellés et al. (2010) y Gangoellés et al. (2011) presentaron una metodología que permite una identificación y una evaluación integrada de impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud en proyectos de obra nueva de construcción residencial. Este artículo va un paso más adelante y explora un enfoque innovador para promover la implementación de sistemas de gestión integrados de impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud en empresas constructoras, a través del control operacional integrado de impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud en obra, para proyectos de obra nueva de construcción residencial.

El objetivo de este artículo es desarrollar un enfoque formal para conceptualizar, organizar y formalizar el conocimiento relacionado con el campo de la gestión integrada de impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud, desarrollando un enfoque basado en la ontología. A través del enfoque basado en la ontología es posible identificar conceptos clave del campo y definir sus relaciones de forma consistente, compartible y comprensible. Primero presentamos una introducción sobre el control operacional de acuerdo con las normas ISO 14001:2004 y OHSAS 18001:2007. Después de proporcionar una breve introducción a las ontologías, la sección 3 describe un enfoque basado en ontología para la gestión integrada de impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud en obra, empleando el riesgo como factor integrador (riesgos para el medioambiente y riesgos para la salud en obra de los trabajadores y de la población de los alrededores). La sección 4 describe el proceso de validación del enfoque basado en ontología. Finalmente, resumimos las principales conclusiones de la investigación y discutimos algunas futuras líneas de investigación en la Sección 5.

2. Control operacional

Con relación al control operacional (Figura 1), ambas normas, ISO 14001:2004 y OHSAS 18001:2007 están focalizadas en la prevención de riesgos y establecen explícitamente que es esencial identificar procesos y actividades que pudieran tener un impacto ambiental significativo o involucrar un importante riesgo a la seguridad y la salud, y que son relevantes para las políticas, objetivos y metas de una organización. Ambos estándares también indican que una organización debe planificar sus actividades, incluyendo mantenimiento, para asegurar que éstas son desarrolladas bajo condiciones específicas, (1) estableciendo y manteniendo procedimientos documentados cuando su ausencia pudiera llevar a desviaciones de la política, objetivos y metas,

Zeng et al., 2007). The difficulty of operating multiple parallel management systems at the same time (Zeng et al., 2007) and the increased compatibility between the different standards (Jørgensen et al., 2006) have led to the idea of integration. Research conducted to date on the most common obstacles encountered by organizations during the implementation of an integrated management system highlights a lack of technical guidance (Zeng et al., 2007; Zeng et al., 2005; Zutshi, 2005; Salomone, 2008; Tam et al., 2008). According to empirical studies reported by several authors, one issue that involves a high level of uncertainty during the adoption of an integrated management system is the integration of elements that correspond to the identification, evaluation and control of environmental impacts and health and safety risks (Salomone, 2008; Pheng and Shiu, 2000; Seiffert, 2008). Gangoellés et al. (2009), Gangoellés et al. (2010) and Gangoellés et al. (2011) presented a methodology allowing the integrated identification and evaluation of environmental impacts and health and safety risks in new-start residential construction projects. This paper goes one step further and explores an innovative approach to promoting the implementation of integrated environmental and health and safety management systems in construction companies through integrated operational control of on-site environmental impacts and health and safety risks in new-start residential construction projects.

The aim of this paper is to develop a formal approach to conceptualizing, organizing and formalizing knowledge related to the domain of on-site integrated environmental and health and safety management by developing an ontology-based approach. Through an ontology-based approach it is possible to identify key concepts in the domain and to define their relations in a consistent, extendable and understandable manner. Firstly, we present an introduction to on-site operational control according to ISO 14001:2004 and OHSAS 18001:2007. After providing a brief introduction to ontologies, Section 3 describes an ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management, using risk as an integrating factor (risk for the environment and risk for the health of on-site workers and the surrounding population). Section 4 describes the process of validating the ontology-based approach. Finally, we summarize the main conclusions of the research and discuss some future directions in Section 5.

2. Operational control

In reference to operational control (Figure 1), both ISO 14001:2004 and OHSAS 18001:2007 are focused on risk prevention and explicitly state that it is essential to identify processes and activities that could have a significant environmental impact or involve a significant health and safety risk and that are relevant to an organization's policies, objectives and targets. Both standards also state that an organization must plan its activities, including maintenance, to ensure that they are carried out under specified conditions by (1) establishing and maintaining documented procedures when their absence could lead to deviations from the policy, objectives and targets,

y (2) estipulando un criterio de operación de los procedimientos, entre otros factores.

and (2) stipulating operating criteria in the procedures, among other factors.

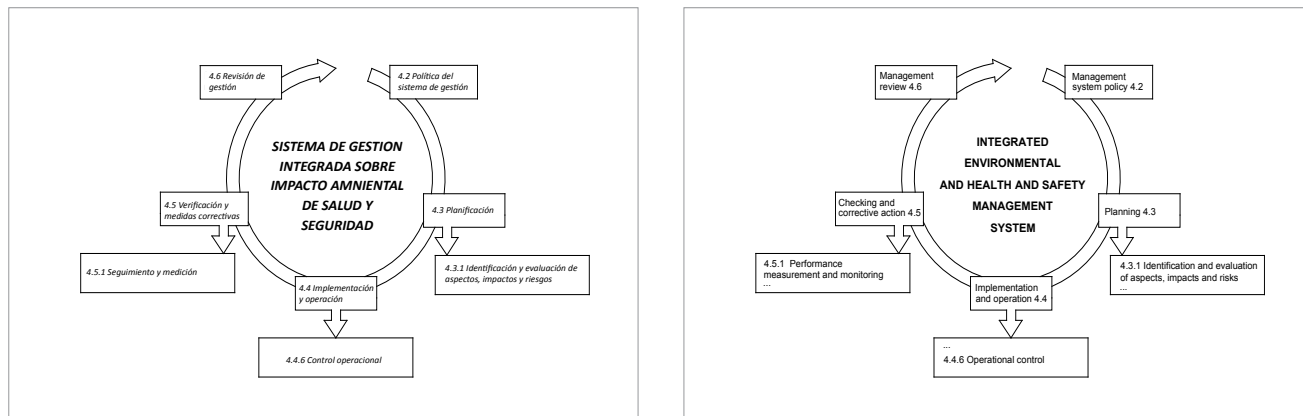


Figure 1. General requirements for an integrated environmental and health and safety management system. Source: adapted from OHSAS 18001:2007 and ISO 90001:2008

Figura 1. Requerimientos generales para un sistema de gestión integrada de impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud. Fuente: adaptado de OHSAS 18001:2007 e ISO 90001:2008

Si consideramos que los impactos ambientales y los riesgos de salud y riesgos de seguridad son características centrales dentro del dominio del control operacional, los procesos constructivos constituyen el vínculo con sus orígenes, mientras que las instrucciones del trabajo representan el vínculo con la acción. Por lo tanto, cuatro conceptos clave (impactos ambientales, riesgos de salud y seguridad, procesos constructivos e instrucciones del trabajo) y sus correspondientes relaciones configuran las bases para un control operacional en obra integrado y eficiente.

If we consider that environmental impacts and health and safety risks are central features within the operational control domain, construction processes represent the link back to their origins, whereas work instructions represent the link to action. Therefore, four key concepts (environmental impacts, health and safety risks, construction processes and work instructions) and their corresponding relations configure the basis for efficient on-site integrated operational control.

A partir de los resultados descritos por Gangoellés et al. (2009) y Gangoellés et al. (2010), podemos concluir que algunos de los riesgos de los procesos constructivos son aplicables tanto al dominio medioambiental como al de la seguridad y la salud. De la misma forma, los documentos que describen el proceso del trabajo para cada operación de construcción (procedimientos documentados) también pueden ser aplicados a ambos campos, el ambiental y el de seguridad y salud. Por lo tanto, los procedimientos documentados también pueden ser gestionados de forma integrada. Una reducción en la duplicidad de procedimientos mediante la combinación de dos sistemas, podría reducir significativamente el tamaño total del sistema de gestión resultante, y lo que es más importante aún, podría mejorar su eficiencia y efectividad.

From the research results described in Gangoellés et al. (2009) and Gangoellés et al. (2010), we can conclude that some of the risks of the construction process apply to the environmental and health and safety domains. Likewise, the documents that describe the work process of each construction operation (documented procedures) may also apply to both the environmental and the health and safety domains. Therefore, documented procedures can also be managed in an integrated way. A reduction in the duplication of procedures by combining the two systems could significantly reduce the overall size of the resulting management system and, more importantly, improve system efficiency and effectiveness.

Un ejemplo práctico de los beneficios de la integración es el proceso de soldadura que describe los requerimientos ambientales, las normas de seguridad y salud de aplicación y el equipamiento que debe usar el operario. Las emisiones de ruido o polvo en la obra de construcción son riesgos que deben ser reducidos para la seguridad y la salud de los trabajadores de la construcción. Sin embargo; este esfuerzo también proporcionaría una mejora ambiental. Sin duda alguna, el control operacional integrado también puede resaltar las incongruencias en uno de los dominios. Una instrucción en obra centrada en el ahorro de agua con el uso agua lluvia, obviamente reducirá el impacto ambiental de consumo de agua durante el proceso constructivo.

A practical example of the benefits of integration is a welding procedure that describes the environmental requirements, the kind of health and safety rules that apply and the equipment the employee has to use. Noise or dust emissions at a construction site are hazards that should be reduced for the health and safety of the construction workers. However, this effort will also provide an environmental improvement. Undoubtedly, integrated operational control can also highlight trade-offs in a single domain. Any on-site instruction focusing on water saving by reusing rainwater will obviously reduce the environmental impact of water consumption during the construction process.

Sin embargo, puede agravar simultáneamente el impacto ambiental de ocupación de terreno por parte de la edificación, las instalaciones provisionales en obra y áreas de almacenamiento. En el dominio de la seguridad y la salud, las instrucciones de trabajo en obra para el uso de audífonos de protección, claramente mitigarán los riesgos de seguridad relacionados con la generación de ruido y vibraciones debido a actividades en obra, pero pueden aumentar el riesgo de que los trabajadores puedan ser golpeados o atropellados por vehículos, puesto que los audífonos pueden impedirles escuchar advertencias sonoras provenientes de los vehículos y maquinarias de construcción. El control operacional integrado puede destacar los potenciales conflictos entre los dominios ambiental y de seguridad y salud. Por ejemplo, una instrucción de trabajo en obra, tal como la ejecución de cierres provisionales de mampostería para prevenir caídas entre diferentes niveles, puede tener claramente un efecto negativo sobre el consumo de materiales durante el proceso de construcción. De la misma forma, cualquier instrucción de trabajo en obra relacionada con la gestión selectiva de residuos tendrá una consecuencia positiva al minimizar impactos ambientales en la categoría de generación de residuos, pero también puede aumentar el riesgo de lesiones debido a golpes o atropellos de vehículos.

En este contexto, el desarrollo de un enfoque basado en ontología se ha considerado adecuado, puesto que las ontologías tradicionalmente han ayudado a representar de forma efectiva los conceptos clave y sus relaciones en determinadas áreas temáticas. Por lo tanto, teniendo en cuenta la aplicación exitosa de las ontologías en otros campos, la siguiente sub-sección desarrolla un enfoque basado en ontología para obtener una mejor entendimiento del control operacional de los impactos ambientales y los riesgos de seguridad y salud en obra.

3. Desarrollo de un enfoque basado en ontología de un sistema para la gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra

No existe una definición universal para el término ontología, pero frecuentemente se cita la proporcionada por Gruber (1993), que definió ontología como “una especificación explícita de una conceptualización”. De acuerdo con Tserng et al. (2009), la ontología puede entenderse como una especificación formal explícita de los conceptos en un determinado ámbito y las relaciones entre ellas. Las ontologías se han considerado útiles porque proporcionan una estructura al conocimiento sobre una determinada área y lo hacen explícito (Darlington y Culley, 2008). Por lo tanto, las ontologías se convierten en una base para la resolución de problemas, la comunicación efectiva, y la gestión y la difusión del conocimiento. Los expertos insisten a menudo que no hay una única forma correcta de modelar un campo. La mejor solución casi siempre depende de la aplicación que el creador de la ontología tenga en mente y de sus extensiones anticipadas (Noy y McGuinness, 2001).

3.1 Metodología

Esta investigación adopta la metodología proporcionada por Noy y McGuinness (2001), puesto que ha sido considerada como la metodología más clara y accesible por los especialistas del dominio, que tienen poco o ningún conocimiento anterior sobre ontologías (Darlington y Culley, 2008). La Figura 2 ilustra los principales pasos de esta metodología:

However, it may also simultaneously worsen the environmental impact of land occupancy by the building, provisional on-site facilities and storage areas. In the health and safety domain, on-site work instructions for using ear protection headphones will clearly mitigate safety risks related to the generation of noise and vibrations due to site activities, but may increase the risk of being hit or run over by vehicles, as headphones may prevent workers from hearing audible warnings from construction vehicles and machinery. Integrated operational control can also underline potential conflicts between the environmental and health and safety domains. For example, an on-site work instruction such as provisional masonry closures to prevent falls between different levels clearly has a negative effect on the environmental impact of raw materials consumption during the construction process. Similarly, any work instruction related to selective waste management will have a positive consequence by minimizing environmental impacts in the category of waste generation, but it may also increase the risk of injuries from being hit or run over by vehicles.

In this context, the development of an ontology-based approach was considered suitable, as ontologies have traditionally helped to effectively represent key concepts and their relationships in a particular subject area. Therefore, on the basis of the successful applications of ontology to other fields, the following subsection develops an ontology-based approach to gaining a better understanding of on-site integrated environmental and health and safety operational control.

3. Development of an ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management

There is no universally agreed definition of ontology, but one that is frequently cited is that given by Gruber (1993), who defined ontology as ‘an explicit specification of a conceptualization’. According to Tserng et al. (2009), ontology can also be referred to as an explicit formal specification of the concepts in a specific domain and the relations among them. Ontologies are considered useful because they bring structure to knowledge about a subject area and make it explicit (Darlington and Culley, 2008). Therefore, ontologies become a basis for problem solving, effective communication, knowledge management and knowledge sharing. Experts often stress that there is no correct way to model a domain. The best solution almost always depends on the application that the ontology developer has in mind and the anticipated extensions (Noy and McGuinness, 2001).

3.1 Methodology

This research adopts the methodology provided by Noy and McGuinness (2001), as it was considered the clearest and most accessible methodology for domain specialists who have little or no prior knowledge of ontologies (Darlington and Culley, 2008). Figure 2 illustrates the main steps in this methodology:

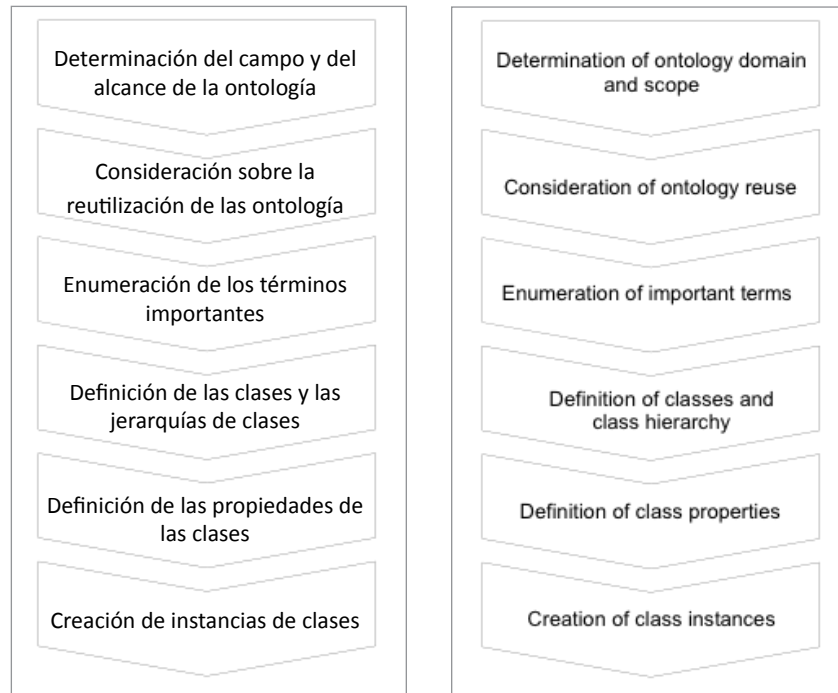


Figure 2. Methodology for ontology development. Source: partially adapted from Noy and McGuinness (2001)
Figura 2. Metodología para el desarrollo de ontología. Fuente: parcialmente adaptada de Noy y McGuinness (2001)

3.1.1 Determinación del campo y del alcance de la ontología

De acuerdo con Noy y McGuinness (2001), responder las siguientes preguntas puede ayudar a obtener el dominio de la ontología.

- ¿Qué dominio de interés cubrirá la ontología?
- El dominio de interés se compone de los conceptos relacionados con el control operacional integrado de los impactos ambientales y de los riesgos de seguridad y salud en obra, dentro del marco de las normas ISO 14001:2004 and OHSAS 18001:2007.
- ¿Para qué se empleará la ontología?
- El propósito del enfoque basado en ontología es proveer un contexto de conocimiento que pueda ayudar a plantear y a responder todas las preguntas apropiadas, para establecer un marco bien definido para el control integrado de los impactos ambientales y de los riesgos de seguridad y salud en obra.
- ¿Quién empleará la ontología?
- El enfoque basado en ontología puede ser empleado como una herramienta de guía para que los contratistas gestionen de forma efectiva aquellos impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud en obra, subrayados por la metodología desarrollada por Gangolells et al (2009), Gangolells et al (2010) y Gangolells et al (2011), durante el proceso de construcción. Por lo tanto, después de su implementación en un sistema la ontología web, el enfoque basado en ontología puede ser empleado por los jefes de obra, los responsables de seguridad y salud y los responsables de medio ambiente durante los trabajos de construcción.

3.1.1 Determining the domain and scope of the ontology

According to Noy and McGuinness (2001), answering the following questions can help to establish the domain of the ontology:

- Which domain of interest will the ontology cover?
- The domain of interest is made up of the concepts concerned with the integrated operational control of on-site environmental impacts and health and safety risks within the framework of ISO 14001:2004 and OHSAS 18001:2007.
- What will the ontology be used for?
- The purpose of the ontology-based approach is to provide a context of knowledge that can assist in raising and answering all the appropriate questions for establishing a well-defined framework for integrated on-site environmental impacts and health and safety hazard control.
- Who will use the ontology?
- The ontology-based approach could be used as a guidance tool for contractors to effectively manage on-site environmental impacts and health and safety risks highlighted by the methodology developed in Gangolells et al. (2009), Gangolells et al. (2010) and Gangolells et al. (2011) during the pre-construction stage. Therefore, after its implementation in a web-based system, the ontology-based approach could be used during construction works by site managers, health and safety officers and environmental officers.

Según Noy y McGuinness (2001), una de las formas de determinar el alcance de la ontología es enumerar una lista de preguntas que debería poder responder. El enfoque basado en ontología para un sistema de gestión integrada de impactos ambientales y de riesgos de seguridad y salud en obra debería proporcionar información sobre las siguientes preguntas de competencia:

- ¿Cuáles son los impactos ambientales y los riesgos de salud y seguridad típicamente relacionados con la construcción de un edificio residencial?
- ¿Qué procesos constructivos pueden causar un determinado impacto ambiental o riesgos de seguridad y salud?
- ¿Qué impactos ambientales y riesgos de salud y seguridad están relacionados con un proceso constructivo en particular?
- ¿Un riesgo particular aplica simultáneamente al dominio ambiental y al de seguridad y salud?
- ¿Qué instrucciones de trabajo deberían implementarse en obra durante las actividades constructivas, para disminuir la significancia de un impacto ambiental o riesgo de seguridad y salud determinado en un proyecto de construcción determinado?
- ¿Qué instrucciones de trabajo implementadas pueden ser tangencialmente beneficiosas o perjudiciales para un determinado impacto ambiental o riesgo de seguridad y salud?
- ¿Qué impactos ambientales y riesgos de seguridad y salud son reducidos, tangencialmente aumentados o tangencialmente disminuidos, al implementar una determinada instrucción de trabajo?

3.1.2 Consideración sobre la reutilización de ontologías existentes

Tuvimos acceso a diversas bibliotecas sobre ontologías, ya que uno de los factores que conducen al desarrollo de las ontologías es la idea de la reutilización y la difusión del conocimiento (Darlington and Culley, 2008). Desgraciadamente, ni la biblioteca de Ontolingua (KSL, 2010) ni la de DAML (DAML, 2010) contenían ontologías reutilizables para el dominio de los impactos ambientales y los riesgos de seguridad y salud en obra. También revisamos numerosos proyectos de investigación dentro del campo de la construcción, tales como el proyecto e-CONSTRUCT (Electronic Communication in the Building and Construction Industry: Preparing for the New Internet; IST-1999-10303) y el proyecto e-COGNOS (Consistent knowledge management across projects and between enterprises in the construction domain; IST-200-28671), pero no contenían ontologías útiles para el propósito anteriormente mencionado. También revisamos la literatura científica existente y encontramos que las ontologías han sido mayoritariamente aplicadas para respaldar los sistemas de gestión de la información y el conocimiento dentro de la industria de la construcción (Anumba et al. 2008b), tales como los enfoques proporcionados por Anumba et al. (2002), El-Diraby et al. (2005), Issa y Mutis (2006), Anumba et al. (2008a), Yurchyshyna y Zarli (2009) y El-Gohary y El-Diraby (2010). En otros casos, la ontología no estaba dedicada al modelado de conceptos y a las interrelaciones de un sub-dominio en particular, sino que respaldaban otras aplicaciones como los enfoques proporcionados por Staub-French et al. (2003) y Edum-Fotwe y Price (2009).

According to Noy and McGuinness (2001), one of the ways to determine the scope of an ontology is to sketch a list of questions that it should be able to answer. The ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management should provide information about the following competency questions:

- Which environmental impacts and health and safety risks are typically related to the construction of a residential building?
- Which construction processes may cause a particular environmental impact or health and safety risk?
- Which environmental impacts and health and safety risks are related to a particular construction process?
- Does a particular risk apply simultaneously to the environmental and health and safety domains?
- Which work instructions should be implemented during on-site construction activities to lower the significance of a particular environmental impact or of a health and safety risk in a specific construction project?
- Which implemented work instructions may be tangentially beneficial or detrimental to a particular environmental impact or health and safety impact?
- Which environmental impacts and health and safety risks are reduced, tangentially increased or tangentially decreased by implementing a particular work instruction?

3.1.2 Considering the reuse of existing ontologies

We accessed several ontology libraries because one of the factors that drive the development of ontologies is the idea of knowledge reuse and shareability (Darlington and Culley, 2008). Unfortunately, neither the Ontolingua library (KSL, 2010) nor the DAML library (DAML, 2010) included reusable ontologies for the on-site environmental and health and safety management domain. We also reviewed several research projects within the construction field, such as the e-CONSTRUCT project (Electronic Communication in the Building and Construction Industry: Preparing for the New Internet; IST-1999-10303) and the e-COGNOS project (Consistent knowledge management across projects and between enterprises in the construction domain; IST-200-28671), but they did not include useful ontologies for the abovementioned purpose. We also revised the existing scientific literature and we found that ontologies have mostly been applied to support information and knowledge management systems within the construction industry (Anumba et al. 2008b), such as the approaches provided by Anumba et al. (2002), El-Diraby et al. (2005), Issa and Mutis (2006), Anumba et al. (2008a), Yurchyshyna and Zarli (2009) and El-Gohary and El-Diraby (2010). In some other cases, the ontology is not just dedicated to modelling the concepts and interrelationships of a particular subdomain, but also supports other applications, such as the approaches provided by Staub-French et al. (2003) and Edum-Fotwe and Price (2009).

En otros artículos, las ontologías respaldan la toma de decisiones durante el proceso de diseño, tales como García et al. (2004), Pandit y Zhu (2007), Ugwu et al. (2005) y Skolick y Kicing (2002). Puesto que el presente estudio está centrado en el dominio de la gestión ambiental, y de seguridad y salud en la obra, ninguna de las ontologías existentes fue considerada útil. Darlington y Culley (2008) plantean que la cantidad de ontologías existentes y disponibles, formalmente documentadas, es mínima en comparación con los dominios potencialmente disponibles para su formalización (la totalidad del mundo conceptual). En consecuencia, cuando buscamos una ontología adecuada, podemos no encontrar la que se relaciona con la presente área de formalización (Darlington y Culley, 2008).

3.1.3 Enumeración de los términos importantes

Este paso consiste en dos tareas: (1) identificación de los conceptos clave y las relaciones en el dominio de interés y (2) producción de definiciones textuales inequívocas para tales relaciones (Darlington y Culley, 2008). Tal y como se indica en la sección 2 y de acuerdo con las especificaciones de las normas ISO 14001:2004 y OHSAS 18001:2007, bajo la sub-sección de control operacional, los impactos ambientales, los riesgos de seguridad y salud, los procesos constructivos y las instrucciones de trabajo son identificados como conceptos cruciales para el control operacional integrado:

- Impactos ambientales: según la norma ISO 14001:2004, los impactos ambientales se definen como cualquier cambio adverso o favorable al medioambiente que total o parcialmente resulte de una actividad, producto o servicio realizado por una organización.
- Riesgos de seguridad y salud: según la norma OHSAS 18001:2007, el riesgo se define como la combinación de probabilidad de ocurrencia de un evento peligroso o la exposición (es) y la severidad de las lesiones o enfermedades que pudieran ser ocasionadas por un evento o exposición (es).
- Procesos constructivos: según el Project Management Institute (2009), un proceso se define como un conjunto de acciones y actividades interrelacionadas que se desarrollan para alcanzar un determinado conjunto de productos, resultados o servicios. Por lo tanto, los procesos constructivos pueden definirse en esta investigación como el conjunto de acciones y actividades interrelacionadas que se desarrollan para alcanzar una entidad constructiva, en este caso, una edificación residencial.
- Instrucciones de trabajo: según las normas ISO 14001:2004 y OHSAS 18001:2007, un procedimiento se define como la forma específica de llevar a cabo una actividad o proceso. Los procedimientos contienen procesos básicos para desarrollar una función a nivel operacional y, por lo tanto, a menudo están respaldados por instrucciones de trabajo detalladas que contienen los procesos exactos para desarrollar la función.

In other papers, ontologies are reported to support decision-making during the design process, such as in Garcia et al. (2004), Pandit and Zhu (2007), Ugwu et al. (2005) and Skolick and Kicing (2002). As the present study focuses on the on-site environmental and health and safety management domain, none of the existing ontologies were found to be useful. Darlington and Culley (2008) argue that the number of existing and available formally represented ontologies is currently minimal when compared with the subject matter that is potentially available for formalization (the entire conceptual world). Consequently, when we look for a suitable ontology, we may not be able to find one that relates to the current area of formalization (Darlington and Culley, 2008).

3.1.3 Enumerating important terms

This step consists of two tasks: (1) identification of the key concepts and relationships in the domain of interest and (2) production of unambiguous text definitions for such relationships (Darlington and Culley, 2008). As stated in section 2 and according to the requirements in ISO 14001:2004 and OHSAS 18001:2007 under the subsection of operational control, environmental impacts, health and safety risks, construction processes and work instructions are identified as crucial for integrated operational control:

- *Environmental impacts: according to ISO 14001:2004, environmental impacts are defined as any adverse or beneficial changes to the environment that wholly or partially result from an organization's activity, product or service.*
- *Health and safety risks: according to OHSAS 18001:2007, risk is defined as the combination of the likelihood of an occurrence of a hazardous event or exposure(s) and the severity of injury or ill health that can be caused by the event or exposure(s).*
- *Construction processes: according to the Project Management Institute (2009), a process is defined as a set of interrelated actions and activities performed to achieve a specified set of products, results, or services. Therefore, construction processes may be defined in this research as a set of interrelated actions and activities performed to achieve a construction entity, in this case, a residential building.*
- *Work instructions: according to ISO 14001:2004 and OHSAS 18001:2007, a procedure is defined as a specified way to carry out an activity or a process. Procedures contain the basic process for performing a function at operational level and are therefore often supported by detailed work instructions, which contain the exact process for performing the function.*



3.1.4 Definición de las clases y de la jerarquía de clases

De acuerdo con Noy y McGuinness (2001), las clases describen los conceptos que existen de forma independiente dentro del dominio. Por lo tanto, la mayoría de las clases en un enfoque basado en ontología para la gestión integrada de los impactos ambientales y de los riesgos de seguridad y salud en obra, corresponden a los conceptos clave identificados en el paso anterior.

Los investigadores anteriores han argumentado que siempre es útil considerar la reutilización de los vocabularios controlados existentes (ontologías, taxonomías o diccionarios). Por esta razón, desarrollamos una exhaustiva búsqueda entre los numerosos vocabularios controlados en el campo de la construcción (Lima et al., 2007), incluyendo ISO 12006-2:2001, Industry Foundation Class (IFC), Lexicon (STABU, Holanda), BARBi-Building and construction reference data library (Norwegian Building Research Institute), bcBuildingDefinitions taxonomy (Proyecto e-CONSTRUCT), terminología ICONDA (Franhofer IRB), BS6100 y UNICLASS (Estándares Británicos), ontología e-COGNOS (Proyecto e-COGNOS), y el Standard Dictionary for Construction (Gencod EAN, Francia). Otras iniciativas incluyen las Industry Foundation Classes (the International Alliance of Interoperability), el Canadian Thesaurus of Construction Science and Technology (National Research Council, Canada), the Construction Management Standards of Practice (the Construction Management Association of America), la Taxonomía MACE (Metadata for Architectural Contents in Europe), y el Diccionario de contenidos sobre trabajos subterráneos (La Ciudad Multidimensional). Desafortunadamente la principal desventaja de todas estas fuentes semánticas es que no incluyen terminología sobre gestión ambiental y de seguridad y salud en la obra, o que no son lo suficientemente concisas. Sin embargo, otros vocabularios controlados en el dominio medioambiental o en el de la seguridad y la salud no se encuentran suficientemente focalizados en el sector de la construcción. En algunos casos específicos los vocabularios controlados se relacionan con la seguridad en la construcción, pero no son lo suficientemente amplios como para cubrir los riesgos de seguridad y salud relacionados con los procesos constructivos y las instrucciones de trabajo sobre seguridad en obra. De la misma forma, algunas fuentes semánticas focalizan en la construcción sostenible, pero no cubren los impactos ambientales de los procesos constructivos y las instrucciones medioambientales de trabajo en obra.

Debido a que no encontramos fuentes semánticas existentes y adecuadas al objetivo principal del enfoque basado en ontología para gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra, definimos las clases y la jerarquía de clases para las clases principales: procesos constructivos, impactos medioambientales, riesgos de seguridad y salud e instrucciones del trabajo. Cada clase principal posee sub-clases e incluso sub-subclases. La sub-clase de una clase representa un concepto que es “un tipo” del concepto que representa la súper clase. En consecuencia, para asegurar la correcta definición de las sub-clases y sub-subclases, todas las sub-clases fueron chequeadas con el objetivo de asegurar que tuvieran una relación “es una” con sus clases.

3.1.4 Defining the classes and the class hierarchy

According to Noy and McGuinness (2001), classes describe concepts that exist independently in the domain. Therefore, major classes in the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management correspond to the key concepts identified in the previous step.

Previous researchers have argued that it is always worth considering the reuse of existing controlled vocabularies (ontologies, taxonomies or thesauruses). For this reason, we carried out an exhaustive search of several controlled vocabularies in the construction domain (Lima et al., 2007), including ISO 12006-2:2001, Industry Foundation Class (IFC), Lexicon (STABU, the Netherlands), BARBi-Building and construction reference data library (Norwegian Building Research Institute), bcBuildingDefinitions taxonomy (e-CONSTRUCT Project), ICONDA terminology (Franhofer IRB), BS6100 and UNICLASS (British Standards), e-COGNOS ontology (e-COGNOS project), and the Standard Dictionary for Construction (Gencod EAN, France). Other initiatives include Industry Foundation Classes (the International Alliance of Interoperability), the Canadian Thesaurus of Construction Science and Technology (National Research Council, Canada), the Construction Management Standards of Practice (the Construction Management Association of America), the MACE Taxonomy (Metadata for Architectural Contents in Europe), and the Content Thesaurus on subterranean works (La Ciudad Multidimensional). Unfortunately, the main disadvantage of all these semantic resources is that they do not include on-site environmental and health and safety management-related terms or they are not concise enough. However, other controlled vocabularies in the environmental or health and safety domains are not sufficiently focused on the construction sector. In some specific cases, controlled vocabularies are related to construction safety, but they are not wide enough to cover health and safety risks related to the construction process and on-site safety work instructions. Similarly, some semantic resources focus on sustainable construction, but they do not cover the environmental impacts of the construction process and on-site environmental work instructions.

Since no existing semantic resources were found to be suitable according to the primary aim of the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management, classes and class hierarchy were defined for the major classes: construction processes, environmental impacts, health and safety risks, and work instructions. Each major class has related subclasses and even sub-subclasses. A subclass of a class represents a concept that is ‘a kind of’ the concept that the superclass represents. Accordingly, to ensure the correct definition of subclasses and sub-subclasses, all the subclasses of a class were checked to ensure that they had an ‘is a’ relation with their class.

a) Procesos Constructivos

ISO 12006-2:2001 establece que determinados sistemas de clasificación que cumplen con los requerimientos regionales o nacionales pueden ser desarrollados, de acuerdo a un enfoque internacional común. Por lo tanto, esta investigación adoptó como procesos constructivos las secciones de trabajo provistas por el Instituto de Tecnología de la Construcción de Cataluña (ITeC), dentro de la base de datos Meta Base (ITeC, 2006). Dos razones apoyan principalmente para esta decisión. En primer lugar, los impactos ambientales y los riesgos de seguridad y salud relacionados con el proceso constructivo fueron obtenidos mediante un enfoque orientado al proceso (Gangoellés et al., 2009; Gangoellés et al., 2010). En ambos casos, las actividades de construcción consideradas fueron las secciones de trabajo provistas por el ITeC dentro de la base de datos Meta Base (ITeC, 2006). En segundo lugar, la base de datos Meta Base (ITeC, 2006), que incluye los precios de referencia para las secciones de trabajo, es la fuente de información mas empleada por las entidades tanto oficiales como privadas (diseñadores y contratistas) en Cataluña desde 1985.

La Figura 3 ilustra parte de las 286 clases, sub-clases y sub-subclases relacionadas con la principal clase "Procesos Constructivos".

a) Construction Processes

ISO 12006-2:2001 states that particular classification systems that meet regional or national requirements can be developed according to a common international approach. Therefore, this research adopted as construction processes the work sections provided by the Catalan Institute of Construction Technology (ITeC) within the MetaBase database (ITeC, 2006). There are two main reasons for this decision. Firstly, environmental impacts and health and safety risks related to the construction process were obtained by means of a process-oriented approach (Gangoellés et al., 2009; Gangoellés et al., 2010). In both cases, the construction stages and activities that were taken into consideration were those work sections provided by the ITeC within the MetaBase database (ITeC, 2006). Secondly, the MetaBase database (ITeC, 2006), which includes reference prices for work sections, is the information source that has been most widely used by official and private entities (designers and contractors) in Catalonia since 1985.

Figure 3 illustrates part of the 286 classes, subclasses and sub-subclasses related to the major class 'Construction processes'.

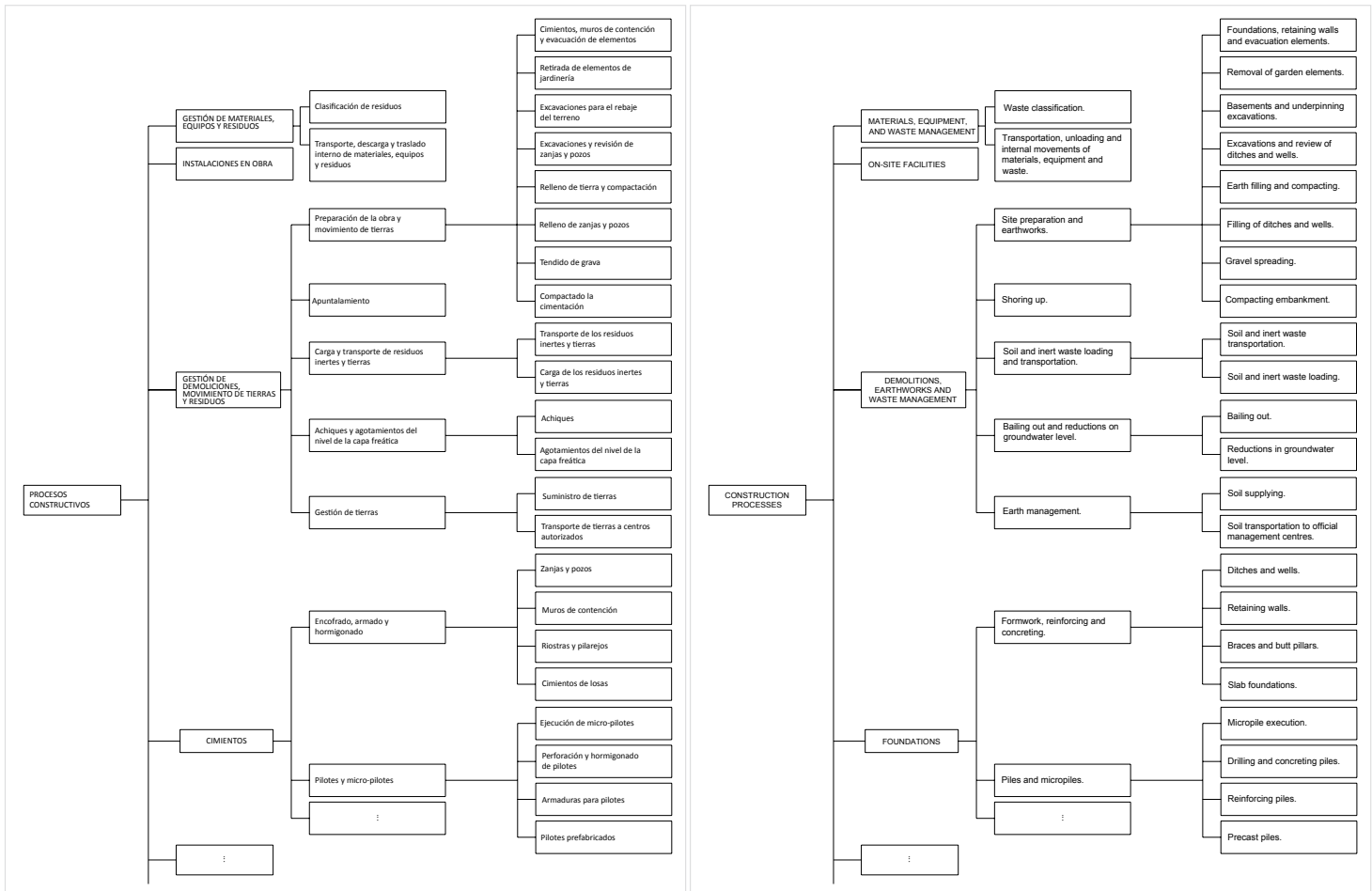


Figure 3. Classes and class hierarchy for 'Construction Processes'. Source: partially adapted from ITeC (2006)
Figura 3. Clases y jerarquía de clases para "Procesos Constructivos". Fuente: parcialmente adaptado de ITeC (2006)



b) Impactos Ambientales

En este caso, las clases y las jerarquías de clases fueron identificadas mediante un enfoque orientado al proceso, empleando los procesos constructivos incluidos en la base de datos Meta Base (ITeC, 2006) y los aspectos ambientales genéricos suministrados por el Eco-Management and Audit Scheme (EMAS). Por lo tanto se empleó un enfoque top-down, puesto que los impactos ambientales de los procesos constructivos fueron obtenidos de impactos ambientales genéricos y estandarizados. Este enfoque que es descrito por Gangolells et al. (2009), mostró que podíamos obtener las clases y la jerarquía de clases dentro de la clase principal "Impactos Ambientales" (Figura 4). En este caso 46 clases, sub-clases y sub-subclases fueron consideradas dentro de la clase principal "Impactos Ambientales".

b) Environmental Impacts

In this case, the classes and class hierarchy were identified by means of a process-oriented approach, using the construction processes provided by the MetaBase database (ITeC, 2006) and the generic environmental aspects provided by the Eco-Management and Audit Scheme (EMAS). Therefore, a top-down approach was used, since the environmental impacts of the construction process were obtained from standardized generic environmental impacts. This approach, which is described in Gangolells et al. (2009), meant that we could obtain the classes and class hierarchy within the major class 'Environmental Impacts' (Figure 4). In this case, 46 classes, subclasses and sub-subclasses were considered within the major class of 'Environmental Impacts'.

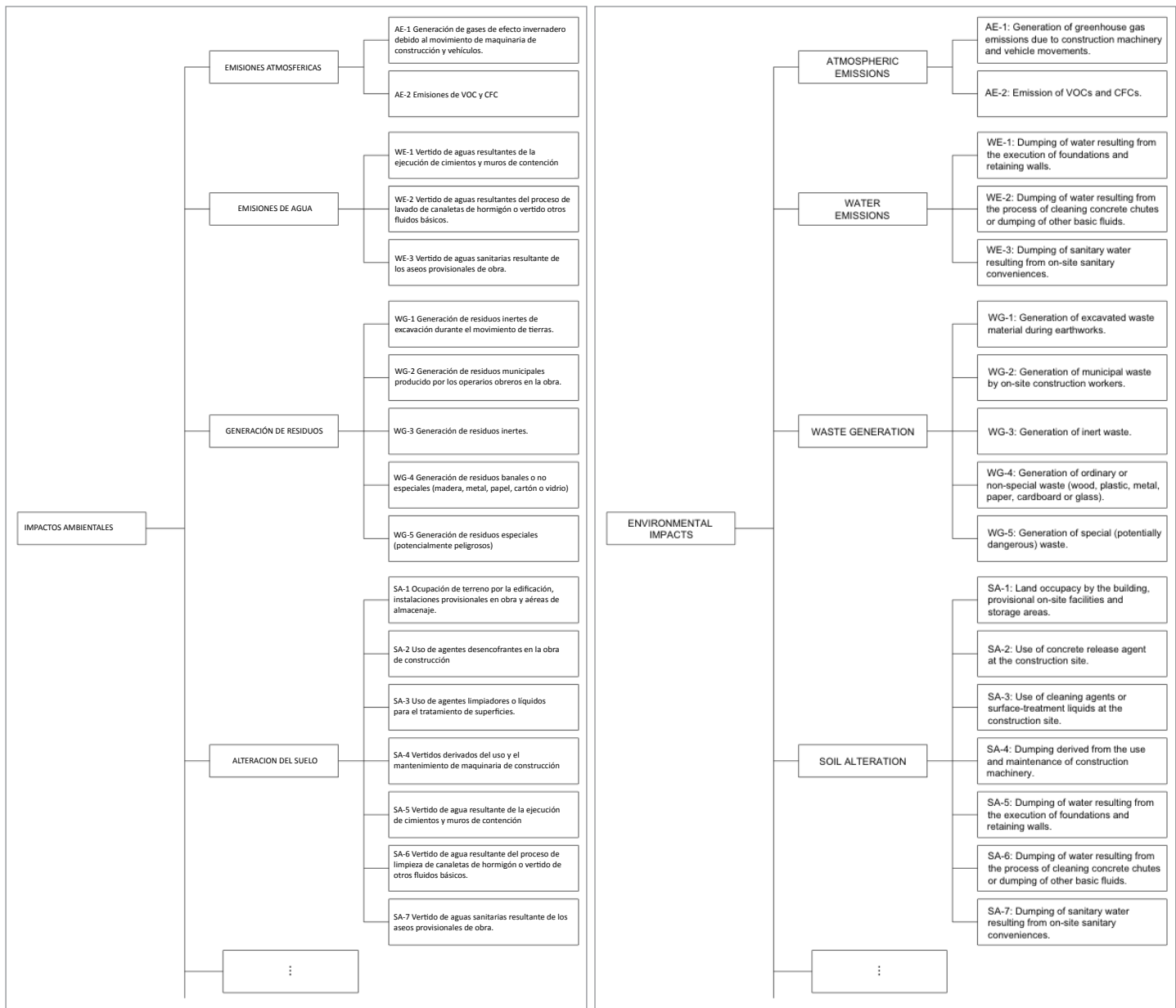


Figure 4. Classes and class hierarchy for 'Environmental Impacts'. Source: partially adapted from Gangolells et al. (2009)
Figura 4. Clases y jerarquía de clases para "Impactos Ambientales" Fuente: parcialmente adaptado de Gangolells et al. (2009).

c) Riesgos de Seguridad y Salud

Los riesgos de seguridad y salud relacionados con los procesos constructivos también fueron obtenidos a través de un enfoque orientado al proceso, empleando los procesos constructivos suministrados por ITeC y los riesgos genéricos de seguridad y salud desarrollados en el Parte de Accidentes de Trabajo del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (Gangolells et al., 2010). En este caso también se empleó un enfoque top-down para identificar las clases y las jerarquías de las clases relacionadas con la clase principal “Riesgos de Seguridad y Salud” (Figura 5). Finalmente se obtuvo un conjunto de 116 clases, sub-clases y sub-subclases dentro de la clase principal “Riesgos de Seguridad y Salud”.

c) Health and Safety Risks

Health and safety risks related to the construction process were also obtained by means of a process-oriented approach, using the construction processes provided by ITeC and the generic health and safety risks provided by the Occupational Accident Report Form of the Spanish National Institute of Safety and Hygiene at Work (Gangolells et al., 2010). In this case, a top-down approach was also used to identify the classes and class hierarchy related to the major class ‘Health and Safety Risks’ (Figure 5). Finally, a set of 116 classes, sub-classes and sub-subclasses were obtained within the major class ‘Health and Safety Risks’.

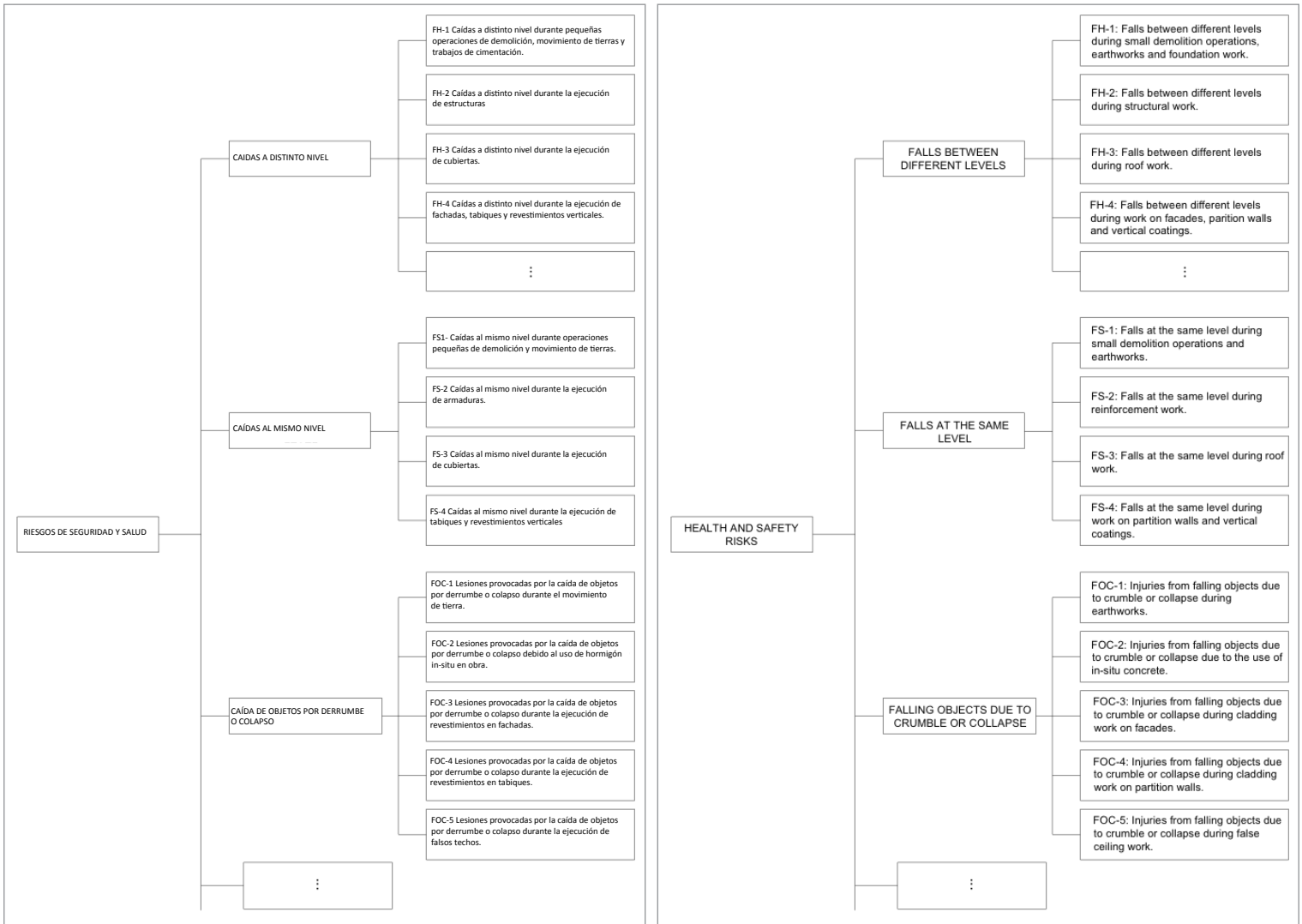


Figure 5. Classes and class hierarchy for ‘Health and Safety Risks’.

Source: partially adapted from Gangolells et al. (2010)

Figura 5. Clases y jerarquía de clases para “Riesgos de Seguridad y Salud”

Fuente: parcialmente adaptado de Gangolells et al. (2010).

Se encontró que algunos de estos riesgos aplicaban simultáneamente al dominio ambiental y al de seguridad y salud. Los aspectos ambientales relacionados con la generación de polvo, que están clasificados dentro de la categoría ambiental “cuestiones locales”, también pertenecen a la categoría de seguridad “contacto con agentes físicos”. Todos los aspectos ambientales relacionados con incidentes, accidentes y situaciones potenciales de emergencia también corresponden a los riesgos en el campo de la seguridad, especialmente dentro de la categoría “incendios y explosiones”.

d) Instrucciones de trabajo

Los trabajos anteriores adoptaron una variedad de métodos para extraer los conceptos importantes del dominio objetivo, incluyendo una revisión de las taxonomías existentes, la revisión de literatura y un análisis de un documento muestra (Tserng et al., 2009). Puesto que no encontramos vocabularios controlados en la literatura existente, que cubrieran las instrucciones de trabajo en obra, empleamos el análisis de documentos muestra como principal método de extracción de conceptos. La base de datos de conocimiento para la extracción de los conceptos clave se basó en las instrucciones ambientales en obra, desarrolladas por el proyecto de investigación europeo RECONS – Reduciendo el impacto ambiental de la construcción - LIFE03 ENV/E/000150 (Gremio de Constructores de Obras de Barcelona y Comarcas, 2007), y en las instrucciones de seguridad en obra publicadas por el Gobierno de Cataluña (Construcciones Rubau et al., 2007). En ambos casos, las instrucciones de trabajo en obra fueron desarrolladas por un panel de expertos. Por lo tanto, puede asumirse que son lo suficientemente detalladas y rigurosas como para configurar una correcta base de datos de conocimiento para la extracción de conceptos. Las referencias documentadas fueron totalmente analizadas para identificar las palabras que tuvieran un significado relevante dentro del dominio. A través de este método de extracción, los conceptos fueron reformulados iterativamente. Esto implicó la descomposición de algunos conceptos en conceptos más simples, la creación de otros conceptos nuevos, juntando todos los grupos de conceptos relacionados y la combinación de algunos conceptos sinónimos dentro de un solo concepto. Finalmente emergió un conjunto de aproximadamente 300 clases, sub-clases y sub-subclases (Figura 6).

Some of the risks were found to apply to both the environmental and the health and safety domains. Environmental aspects related to dust generation, which are classified in the environmental category of ‘local issues’, also belong to the safety category of ‘contact with chemical agents’. The generation of noise and vibrations due to site activities, which are classified into the environmental category of ‘local issues’, also fit the safety category of ‘contact with physical agents’. All the environmental aspects related to incidents, accidents and potential emergency situations also correspond to risks in the safety domain, specifically in the ‘fires and explosions’ category.

d) Work Instructions

Previous studies adopted a variety of methods to extract important concepts from the target domain, including a review of existing taxonomies, a literature review, and an analysis of a sample document (Tserng et al., 2009). Since we did not find any controlled vocabularies in the existing literature that covered on-site work instructions, we used sample document analysis as the major concept extraction method. The knowledge database for concept extraction was based on the on-site environmental instructions developed under the European research project RECONS - Reducing environmental construction impact - LIFE03 ENV/E/000150 (Gremio de Constructores de Obras de Barcelona y Comarcas, 2007) and the on-site safety work instructions published by the Government of Catalonia (Construcciones Rubau et al., 2007). In both cases, the on-site work instructions were developed by a panel of experts. Therefore, it can be assumed that they are comprehensive and rigorous enough to configure the right knowledge database for concept extraction. Selected reference documents were thoroughly analysed to identify words with a relevant meaning within the domain. Through this extraction method, the concepts were reformulated iteratively. This involved decomposing some concepts into simpler ones, creating new ones, clustering together any set of related concepts, and combining some synonymous concepts into a single concept. Finally, a set of approximately 300 classes, sub-classes and sub-subclasses emerged (Figure 6).

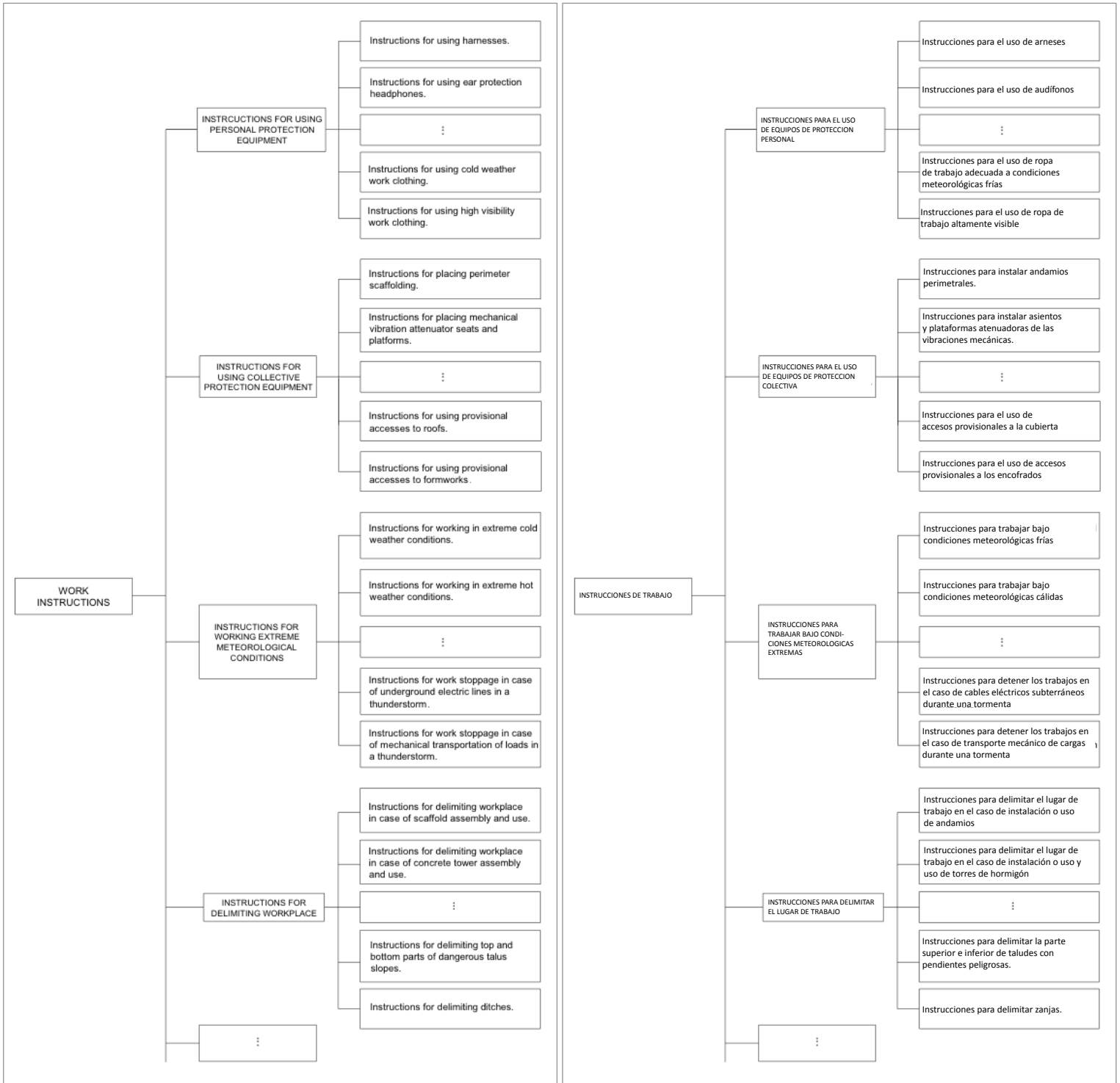


Figure 6. Classes and class hierarchy for 'Work Instructions'. Source: own elaboration
Figura 6. Clases y jerarquía de clases para "Instrucciones de Trabajo". Fuente: elaboración propia

3.1.5 Definición de las propiedades de las clases

Según Noy y McGuinness (2001), las clases por sí mismas no proveen información suficiente para responder a las preguntas de competencia formuladas en el primer paso. Una vez definidas las clases debe describirse la estructura de los conceptos. Por lo tanto, este paso se centró en generar un conjunto de relaciones (o propiedades) que mostrara una representación estructural de las clases identificadas. Una propiedad está unida a la clase más general que puede tener esa propiedad. Todas las sub-clases de una clase heredan la propiedad de esa clase. La Figura 7 ilustra la estructura conceptual que define las interacciones dentro de varios conceptos en el dominio del problema:

3.1.5 Defining the properties of classes

According to Noy and McGuinness (2001), classes on their own do not provide enough information to answer the competency questions defined in the first step. Once the classes have been defined, the structure of the concepts must be described. Therefore, this step focused on generating a set of relationships (or properties) that showed a structural representation of the identified classes. A property is attached to the most general class that can have that property. All the subclasses of a class inherit the property of that class. Figure 7 illustrates the conceptual structure that defines the interactions between the various concepts in the problem domain:

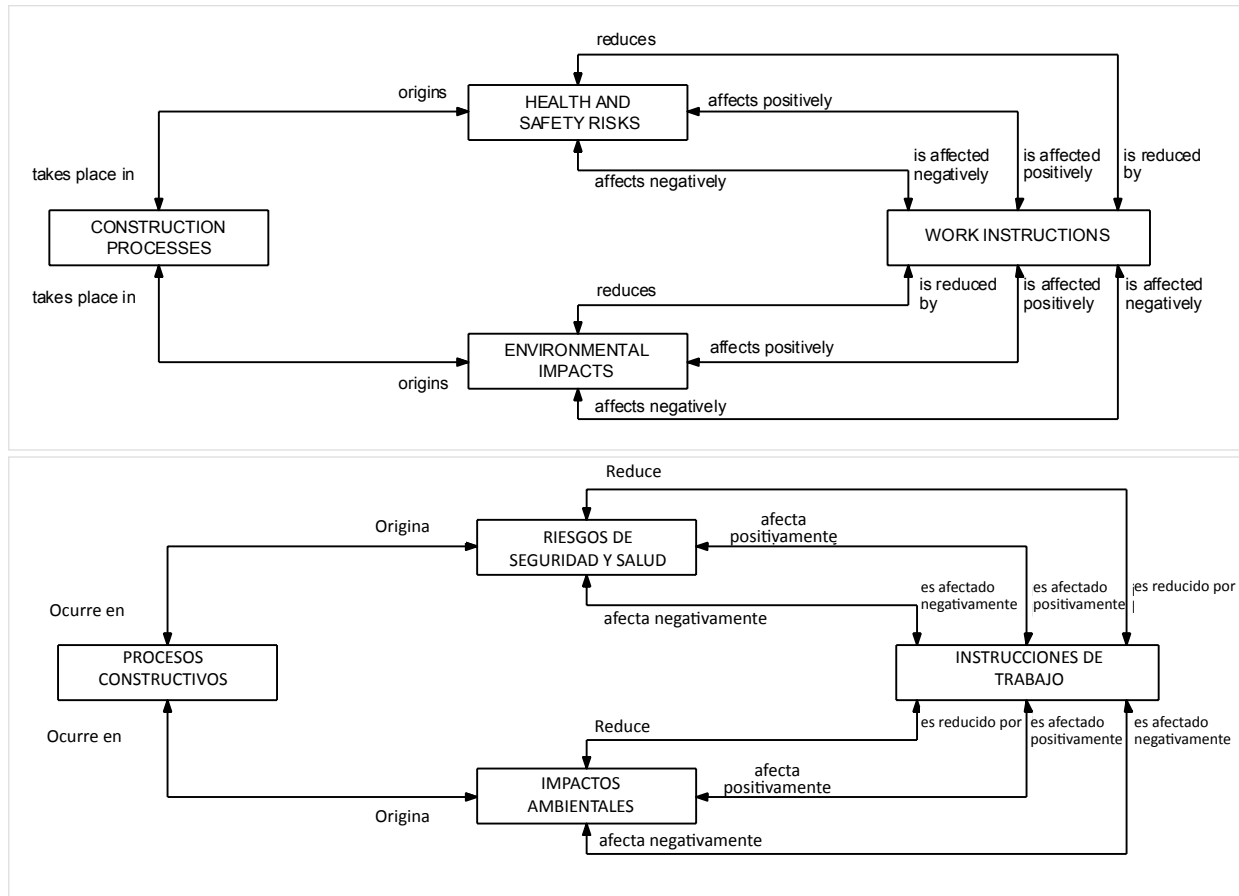


Figure 7. Conceptual structure showing the relationships between major classes in the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management. Source: own elaboration.

Figura 7. Estructura conceptual que muestra las relaciones entre las principales clases del enfoque basado en ontología, para la gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra. Fuente: elaboración propia

Luego, se han definido las siguientes propiedades:

- La relación "ocurre en" vincula los "Riesgos de Seguridad y Salud" e "Impactos Ambientales" con los correspondientes "Procesos Constructivos". Cada riesgo de seguridad y salud/impacto ambiental ocurre durante uno o más procesos constructivos. La relación "origina" es la relación inversa a "ocurre en".
- La relación "reduce" vincula "Instrucciones de Trabajo" con los correspondientes "Riesgo de Seguridad y Salud" e "Impactos Ambientales". Cada instrucción de trabajo puede reducir uno o más riesgos de seguridad y salud / impactos ambientales. La relación "es reducida por" es la inversa a "reduce".

Thus, the following properties have been defined:

- The relationship 'takes place in' relates 'Health and Safety Risks' and 'Environmental Impacts' to the corresponding 'Construction Processes'. Each health and safety risk / environmental impact takes place during one or more construction processes. The relationship 'origins' is the inverse relation of 'takes place in'.
- The relationship 'reduces' relates 'Work Instructions' to the corresponding 'Health and Safety Risks' and 'Environmental Impacts'. Each work instruction may reduce one or more health and safety risks / environmental impacts. The relationship 'is reduced by' is the inverse of 'reduces'.

- La relación “afecta positivamente” vincula las “instrucciones de Trabajo” con los correspondientes “Riesgo de Seguridad y Salud” e “Impactos Ambientales”. Aunque no ha sido implementada con este propósito, una instrucción de trabajo puede afectar positivamente uno o más riesgos de seguridad y salud / impactos ambientales. La relación “es afectada positivamente” es la inversa de “afecta positivamente”
- La relación “afecta negativamente” vincula las “Instrucciones de Trabajo” con los correspondientes “Riesgos de Seguridad y Salud” e “Impactos Ambientales”. Aunque no ha sido implementada con este propósito, una instrucción de trabajo puede afectar uno o más riesgos de seguridad y salud / impactos ambientales de forma negativa.
- *The relationship ‘affects positively’ relates ‘Work Instructions’ to corresponding ‘Health and Safety Risks’ and ‘Environmental Impacts’. Although not implemented for this purpose, a work instruction may positively affect one or more health and safety risks / environmental impacts. The relationship ‘is affected positively’ is the inverse of ‘affects positively’.*
- *The relationship ‘affects negatively’ relates ‘Work Instructions’ to corresponding ‘Health and Safety Risks’ and ‘Environmental Impacts’. Although not implemented for this purpose, a work instruction may affect one or more health and safety risks / environmental impacts negatively. The relationship ‘is affected negatively’ is the inverse relation of ‘affects negatively’.*

La relación “ocurre en” que vincula “Riesgos de Seguridad y Salud” y los “Impactos Ambientales” con los correspondientes “Procesos Constructivos” y su relación inversa “origina”, fueron obtenidas por medio de un enfoque orientado al proceso (Gangoellis et al., 2009; Gangoellis et al., 2010). Las otras relaciones que vinculan las “Instrucciones de Trabajo” con los correspondientes “Riesgos de Seguridad y Salud” e “Impactos Ambientales” fueron específicamente derivadas teniendo en cuenta el propósito del enfoque basado en ontología para un sistema de gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra, con la ayuda de un panel de expertos. Finalmente, más de 6100 relaciones se incluyeron dentro del enfoque basado en ontología para un sistema de gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra.

3.1.6 Creación de las instancias de las clases

Según Noy y McGuinness (2001), el último paso es crear las instancias individuales de las clases de la jerarquía. Para definir la instancia individual de una clase, se debe escoger una clase, crear una instancia individual de aquella clase y llenarla con los valores de las propiedades específicas. En este caso, para el propósito de este estudio la creación de instancias no fue necesaria. Las instancias sólo debieran ser creadas en el caso de que una empresa constructora en particular, que emplea un enfoque basado en ontología desarrollado para la gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra, empleando sus propios procedimientos y sus propias instrucciones de trabajo. En este caso, una determinada instrucción de trabajo, que ya existe en la empresa constructora, podría ser una instancia correspondiente a una sub-clase o sub-subclase de la ontología. La creación de instancias de clases permite que las instrucciones de trabajo, ya existentes dentro de una empresa constructora, sean semánticamente igualadas con las clases y sub-clases desarrolladas, lo que permite universalizar la ontología.

Both the relationship ‘takes place in’, which relates ‘Health and Safety Risks’ and ‘Environmental Impacts’ to the corresponding ‘Construction Processes’, and its inverse relationship ‘origins’ were obtained by means of a process-oriented approach (Gangoellis et al., 2009; Gangoellis et al., 2010). Other relationships that relate ‘Work Instructions’ to the corresponding ‘Health and Safety Risks’ and ‘Environmental Impacts’ were specifically derived to take into account the purpose of the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management with the help of a panel of experts. Finally, more than 6100 relationships were included within the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management.

3.1.6 Creating instances of classes

According to Noy and McGuinness (2001), the last step is to create individual instances of classes in the hierarchy. To define an individual instance of a class, we must choose a class, create an individual instance of that class and fill in the specific property values. In this case, for the purpose of this study no instances needed to be created. Instances should only be created in the case of a particular construction company that uses the developed ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management and has its own procedures and on-site work instructions. In this case, a particular on-site work instruction that already exists in the construction company could be an instance of the corresponding subclass or sub-subclass of the ontology. The creation of instances of classes allows work instructions that already exist in any construction company to be semantically matched to the developed classes and subclasses, which allows the ontology to be universalized.



4. Validación del enfoque basado en ontología para una gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra

Para validar el enfoque basado en ontología, se desarrollaron dos actividades preliminares. En primer lugar las verificaciones se realizaron revisando si la información estaba disponible en el enfoque basado en ontología y revisando si existían las relaciones correctas. En segundo lugar, de acuerdo a las sugerencias de la literatura existente, se emplearon las preguntas de competencia para validar la solución. El enfoque basado en ontología para una gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra fue capaz de responder las preguntas de competencia que fueron definidas inicialmente (Sección 3.1.1). Por lo tanto, en esta etapa se consideró que la estructura conceptual era razonable y correcta para su propósito.

El enfoque basado en ontología para una gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud en obra se implementó a través de Protégé 3.4 beta, que es la herramienta más usada para extender y difundir las ontologías en un rango amplio de dominios de conocimiento. Este editor de fuente abierta facilita la visualización de las soluciones conducidas por ontología y permite una administración fácil de las clases, subclases y sub-subclases y sus correspondientes relaciones. La implementación de la solución en Protégé 3.4 beta nos permitió verificar la robustez y consistencia del enfoque propuesto.

Finalmente, cuando la versión computarizada del enfoque basado en ontología fue correctamente verificado, se realizó una evaluación externa. En la primera etapa, con el fin de asegurar una sencilla navegación, se pidió a los expertos que encontrarán cuatro conceptos dentro de la aplicación. En base a los resultados, podemos concluir que la facilidad de navegación del enfoque basado en ontología es aceptable.

En segundo lugar, se pidió a los expertos que comprobarán si el enfoque basado en ontología podría responder las preguntas de competencia pre-definidas. Con el objetivo de facilitar la evaluación externa, las preguntas tuvieron que ser personalizadas. Después de esta actividad de validación, se pudo concluir que el enfoque basado en ontología incluye todos los impactos ambientales y los riesgos de seguridad y salud que están típicamente relacionados con el proceso constructivo de una edificación residencial (Figuras 8 y 9). También puede asegurarse que el enfoque basado en ontología ilustra aquellos procesos constructivos, en los cuales ocurre un determinado impacto ambiental o riesgo de seguridad y salud, así como sus relaciones inversas (los impactos ambientales o riesgo de seguridad y salud que tienen lugar como consecuencia de desarrollar un proceso constructivo en particular) (Figura 10). Esta actividad de validación también permitió asegurar que el enfoque basado en ontología puede mostrar si un riesgo determinado puede pertenecer simultáneamente al dominio ambiental y al de seguridad y salud. (Figura 11). Según los

4. Validation of the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management

To validate the ontology-based approach, we carried out two preliminary activities. First, verifications were made by checking whether the information was available in the ontology-based approach and whether the right relations existed. Secondly, according to suggestions in the existing literature, competency questions were used to validate the ontology-driven solution. The ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management was found to be able to answer the competency questions that were initially defined (see Section 3.1.1). Therefore, at this stage, the conceptual structure was considered reasonable and correct for its intended purpose.

The ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management was implemented through Protégé 3.4 beta, the most widely used tool for extending and sharing ontologies in a broad range of knowledge domains. This open-source editor facilitates the visualization of ontology-driven solutions and allows easy management of classes, subclasses, sub-subclasses and the corresponding relations. The implementation of the solution in Protégé 3.4 beta allowed us to verify the robustness and consistency of the proposed approach.

Finally, once the computerized version of the ontology-based approach had been correctly verified, an external evaluation was carried out by three domain experts, all of whom had PhDs in construction engineering. In the first stage, to assure ease of navigation, the experts were asked to find four concepts in the application. Based on the results, we can conclude that the ease of navigation of the ontology-based approach is acceptable.

Secondly, the experts were asked to check whether the ontology-based approach could answer the pre-defined competency questions. However, the competency questions had to be customized to make the external evaluation easier. After this validation activity, we concluded that the ontology-based approach showed all the environmental impacts and health and safety risks that are typically related to the construction process of a residential building (Figure 8 and 9). We also certified that the ontology-based approach illustrates the construction processes in which a particular environmental impact or health and safety risk occurs and its inverse relations (the significant environmental impacts and health and safety risks that take place as a consequence of performing a particular construction process) (Figure 10). This validation activity also allows us to state that the ontology-based approach can show whether a particular risk is simultaneously applicable to the environmental and the health and safety domains (Figure 11).

expertos, para cada impacto ambiental o riesgo de seguridad y salud, el enfoque basado en ontología ilustra que instrucciones de trabajo que han sido implementadas para reducir su importancia (Figura 12). El enfoque basado en ontología también muestra cómo las instrucciones de trabajo que han sido implementadas para disminuir la importancia de un determinado impacto ambiental o riesgo de seguridad y salud pueden afectar positiva o negativamente a la importancia de otros impactos ambientales o riesgos de la seguridad y salud. Finalmente, la solución dirigida por ontología también muestra aquellos impactos ambientales y riesgos de la seguridad y salud que son reducidos, tangencialmente aumentados o tangencialmente disminuidos después de haber implementado una determinada instrucción de trabajo (Figura 13). Los resultados obtenidos durante esta actividad de validación permitieron concluir que el enfoque basado en ontología es razonable y correcto de acuerdo con su propósito.

Finalmente, se realizaron entrevistas con los expertos del para asegurar la aplicabilidad potencial del enfoque propuesto basado en ontología. Los expertos no hicieron comentarios importantes sobre esta materia y la evaluación general del enfoque basado en ontología para la gestión integral medioambiental y de riesgos de salud y seguridad fue positiva.

According to the experts, for each environmental impact or health and safety risk, the ontology-based approach illustrates which work instructions may be implemented to reduce its significance (Figure 12). The ontology-based approach also shows how work instructions that are implemented to diminish the significance of a particular environmental impact or health and safety risk may positively or negatively affect the significance of other environmental impacts or health and safety risks. Finally, it was found that the ontology-driven solution also shows the environmental impacts and health and safety risks that were reduced, tangentially increased or tangentially decreased as a result of implementing a particular work instruction (Figure 13). Results obtained during this validation activity enabled us to conclude that the ontology-based approach was reasonable and correct for its intended purpose.

Finally, interviews were held with the domain experts to assure the potential applicability of the proposed ontology-based approach. The experts did not make any major comments on this issue and the general assessment of the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management was positive.

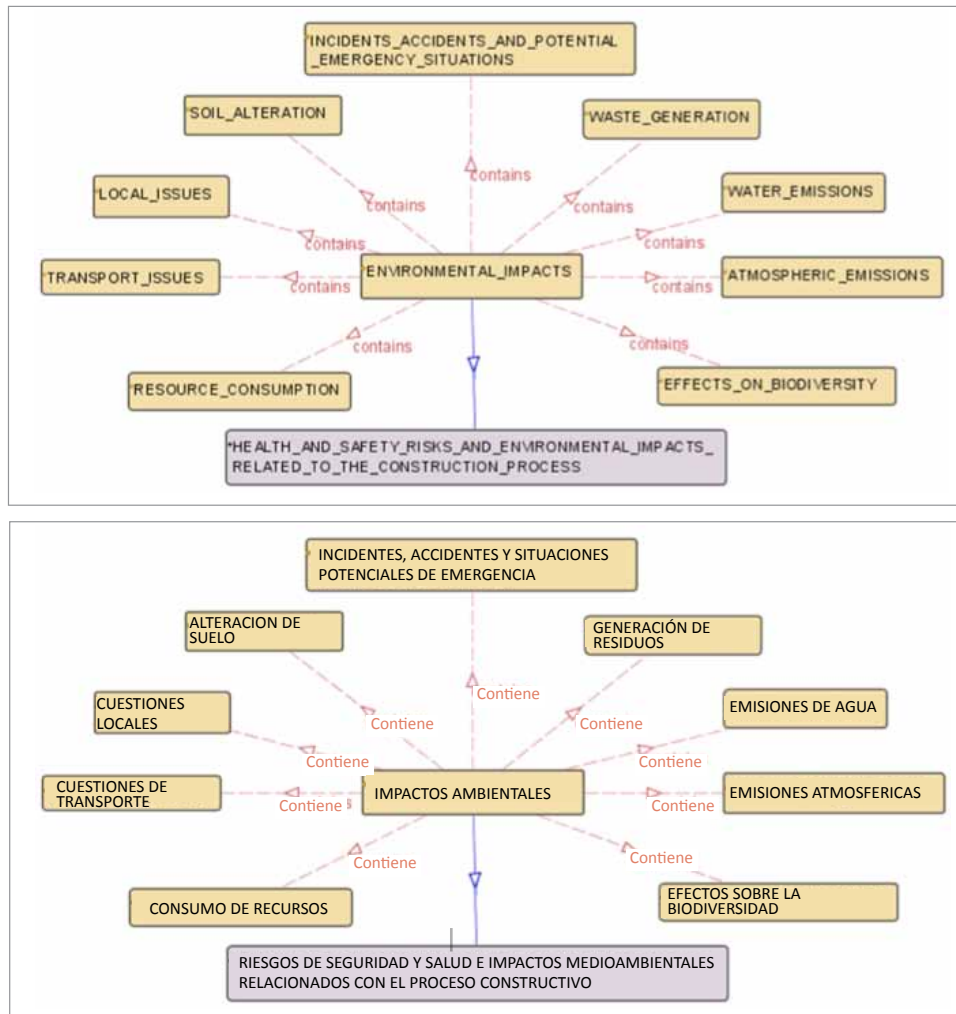


Figure 8. Relationship between the category 'Local Issues' and 'Environmental Impacts'

Figura 8. Relación entre la categoría "Cuestiones Locales" e "Impactos Medioambientales"

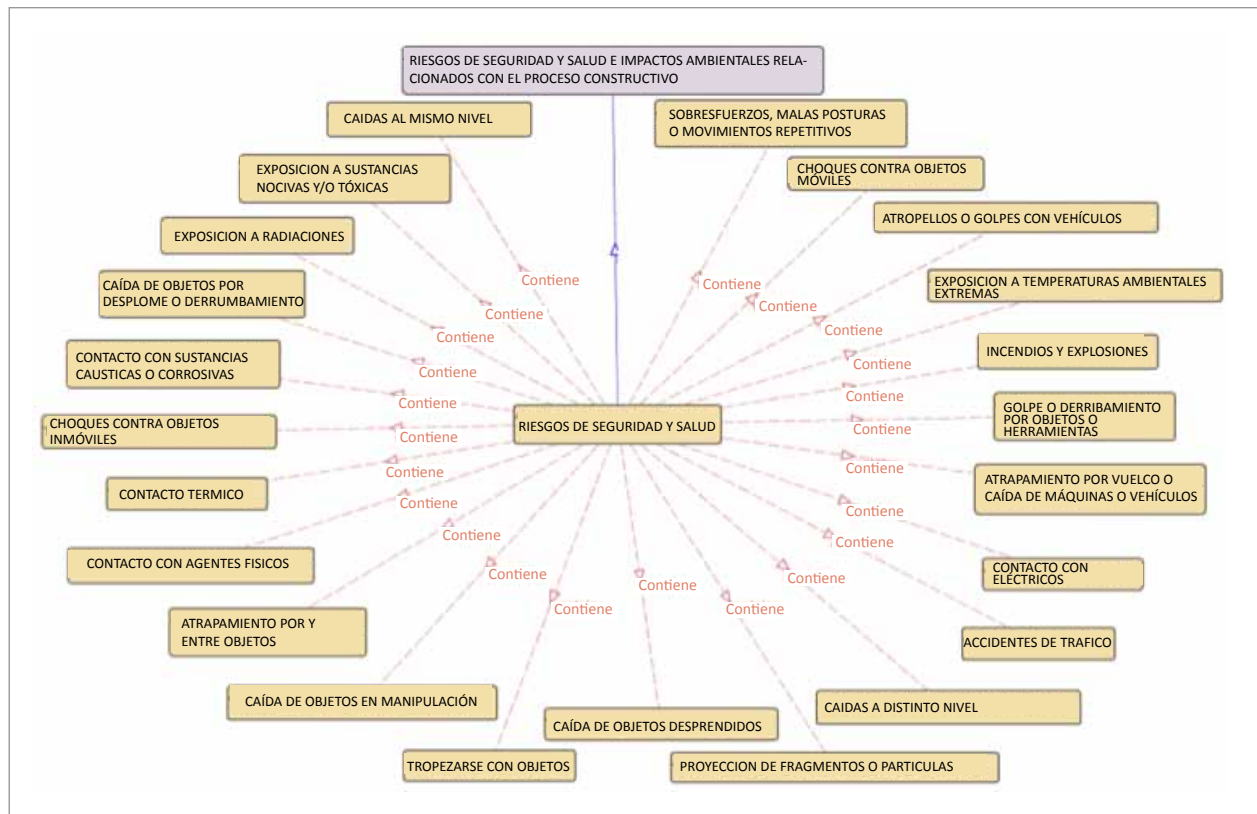
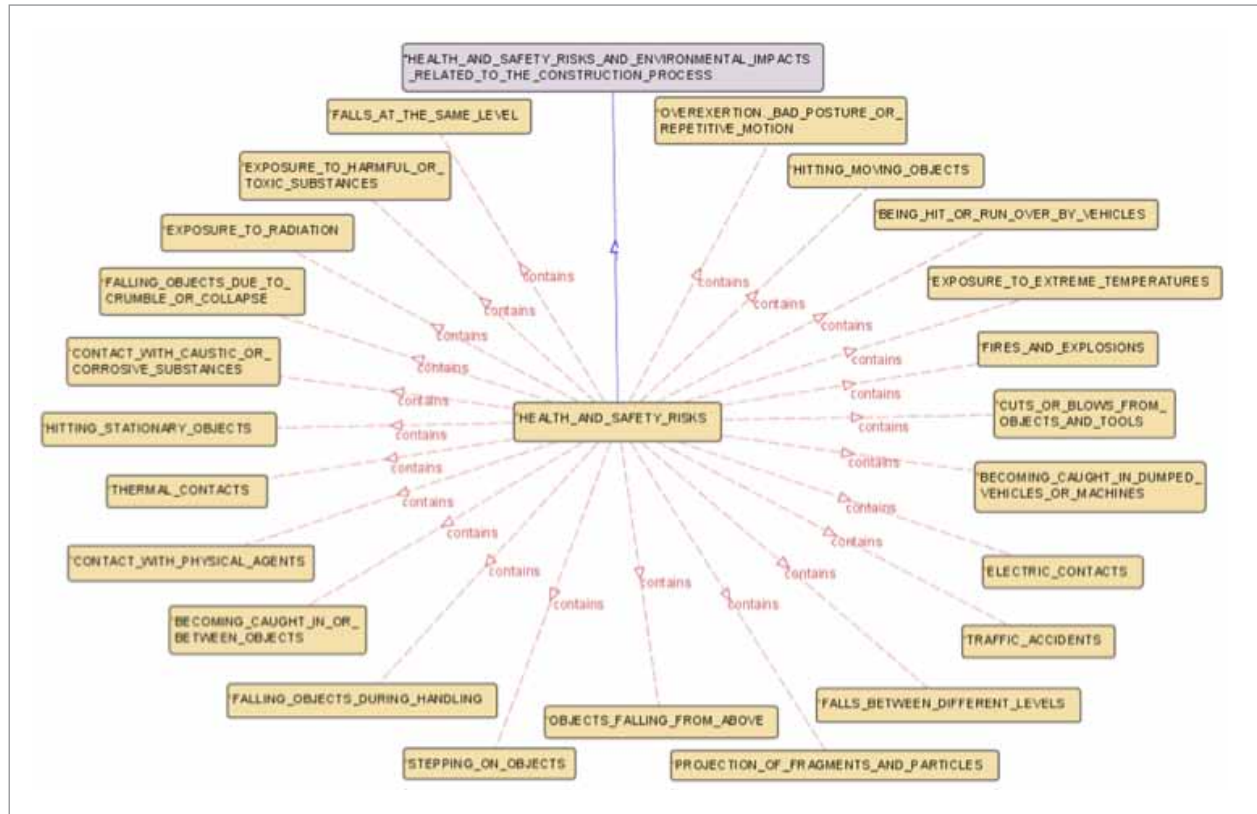


Figure 9. Relationship between the category ‘Contact with Physical Agents’ and ‘Health and Safety Risks’
Figura 9. Relación entre la categoría “Contacto con Agentes Físicos” y “Riesgos de Seguridad y Salud”

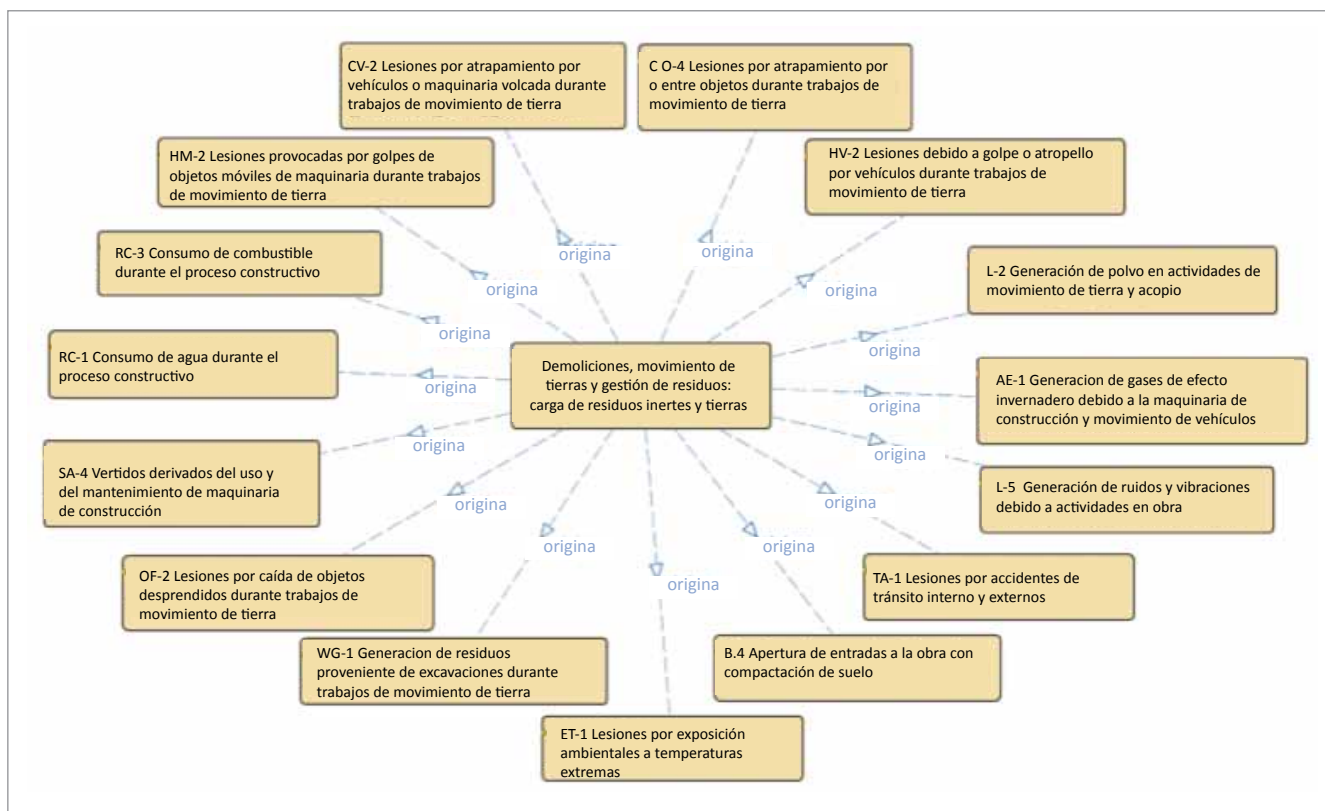
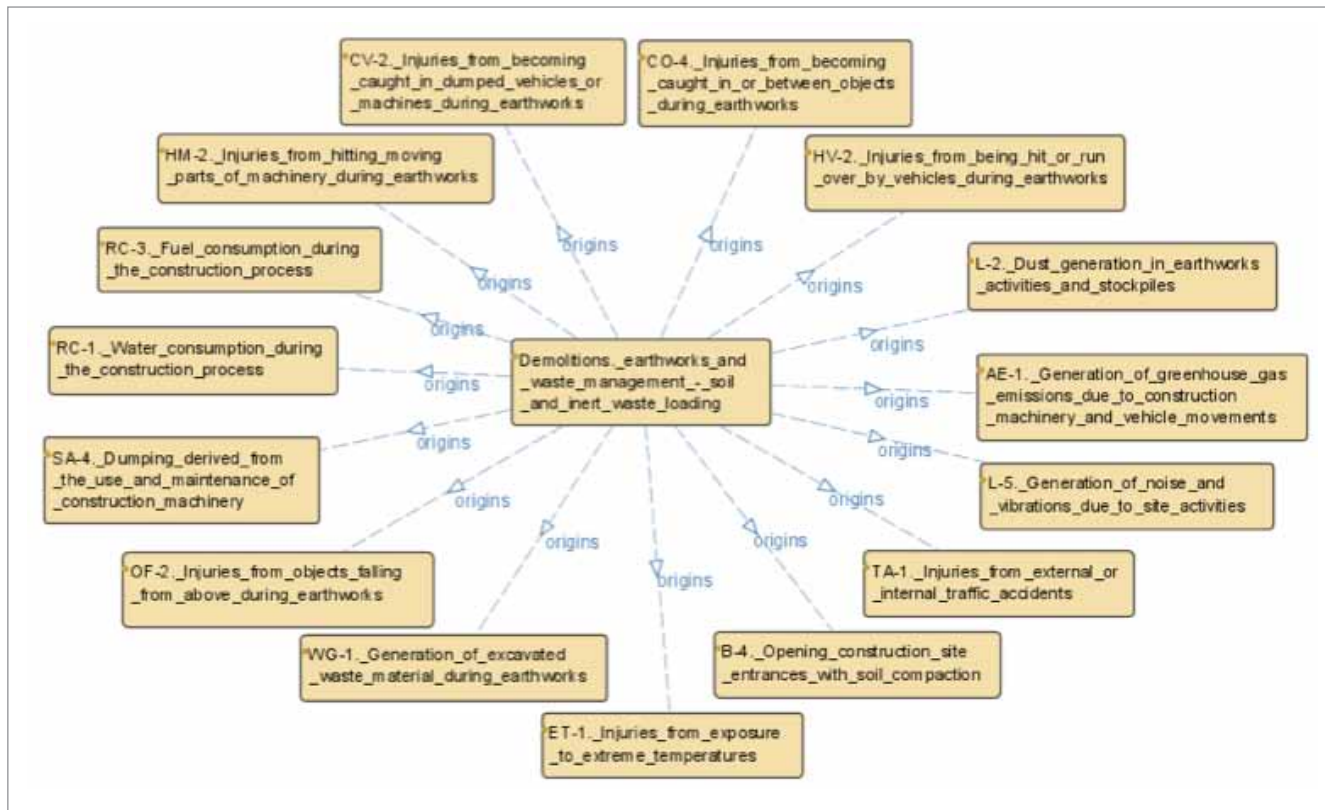


Figure 10. Identification of environmental impacts and health and safety risks related to the construction process 'demolitions, earthworks and waste management: soil and inert waste loading'

Figura 10. Identificación de impactos medioambientales y riesgos de seguridad y salud relacionados con el proceso constructivo "demoliciones, movimientos de tierra y gestión de residuos: carga de residuos inertes y de tierras"

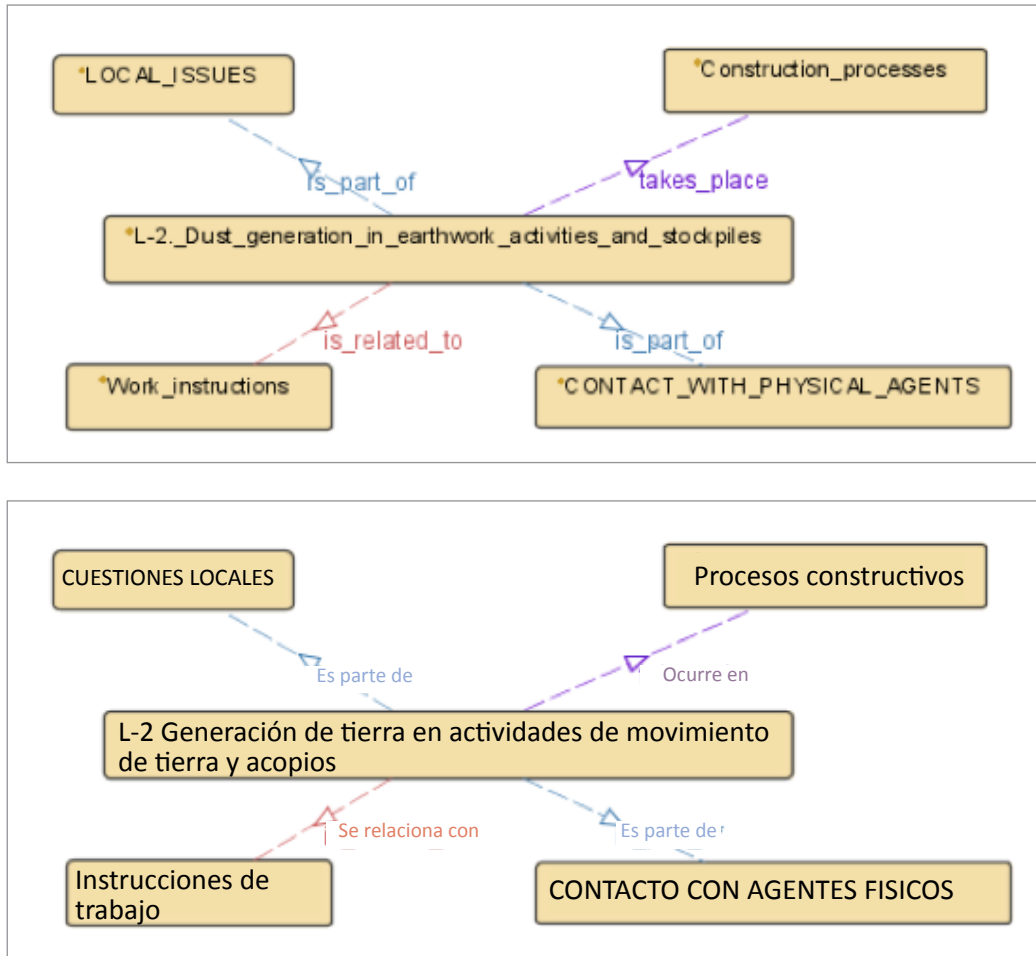


Figure 11. Available information related to the environmental impact / health and safety risk L-2 (dust generation in earthwork activities and stockpiles)

Figura 11. Información disponible para el impacto ambiental / riesgo de seguridad y salud L-2 (generación de polvo en actividades de movimiento de tierra y acopios)

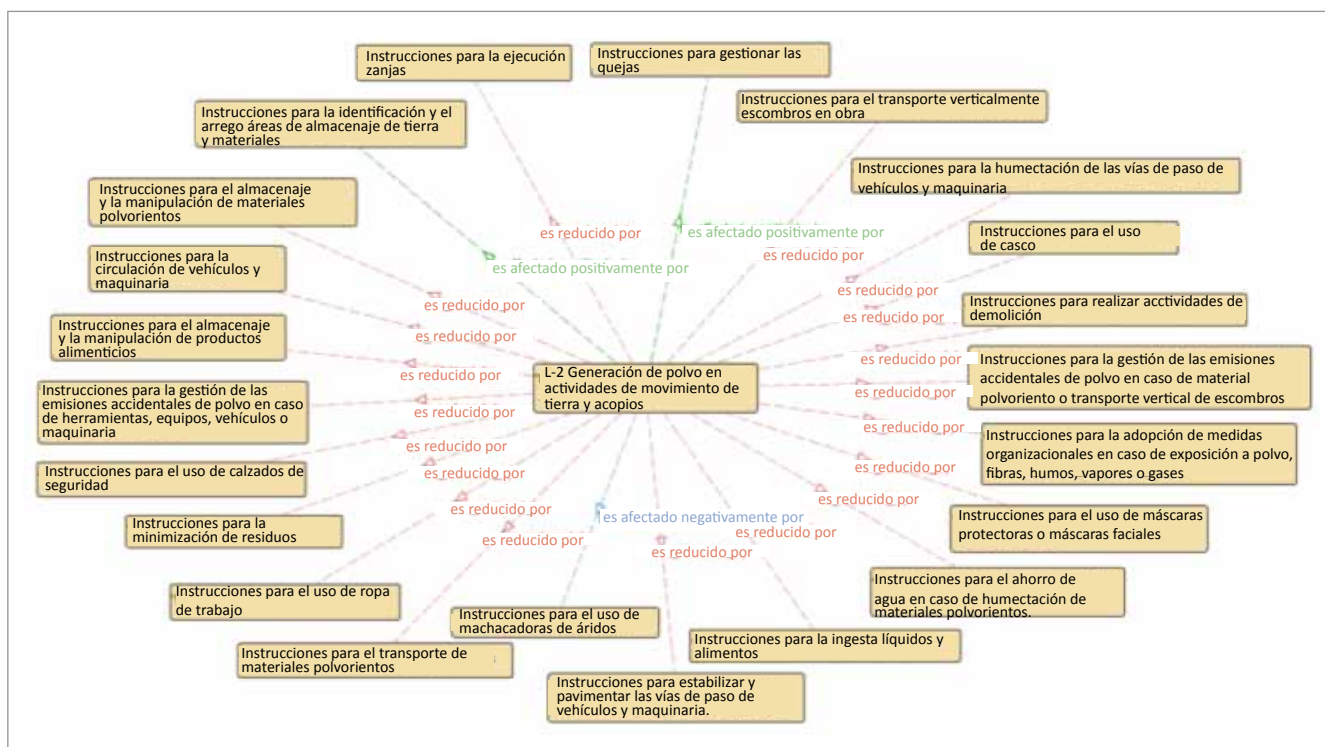
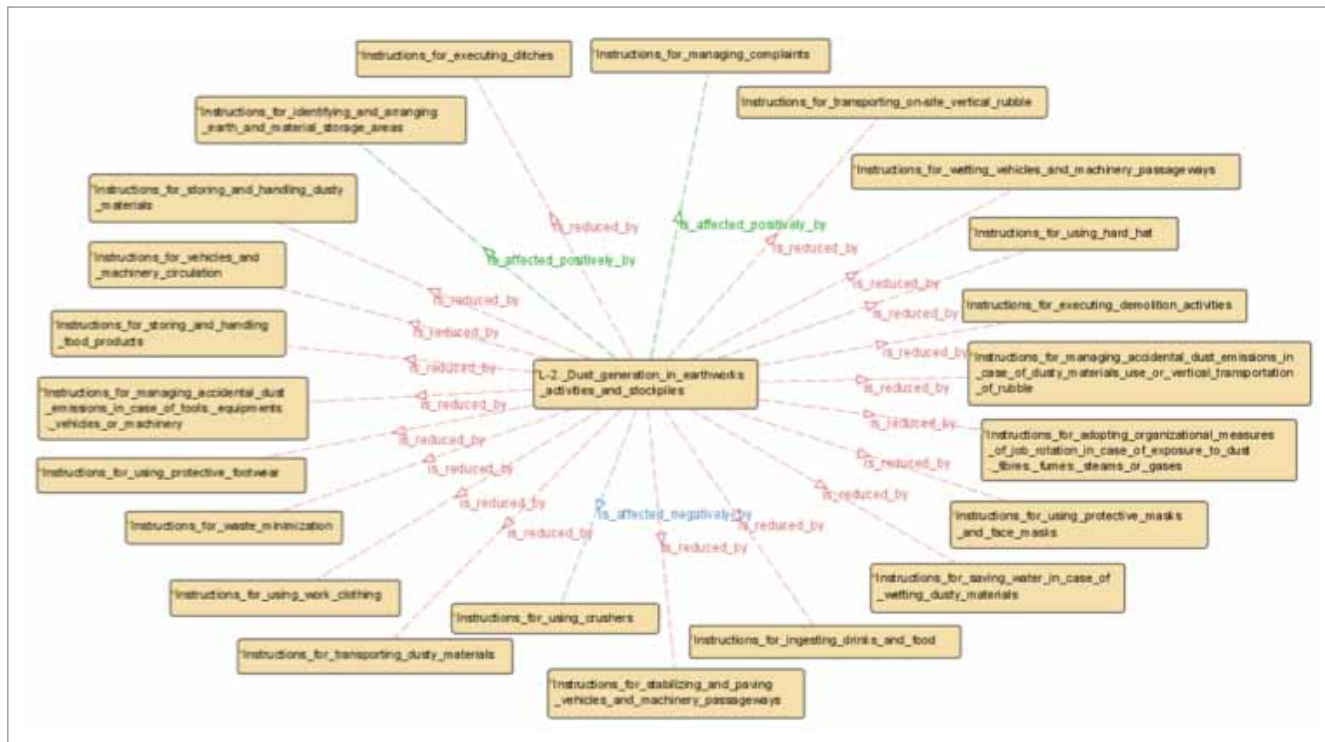


Figure 12. Identification of work instructions related to the environmental impact / health and safety risk L-2 (dust generation in earthwork activities and stockpiles)

Figura 12. Identificación de instrucciones de trabajo relacionadas con impacto ambiental / riesgos de seguridad y salud L-2 (generación de polvo en actividades de movimiento de tierra y acopios)

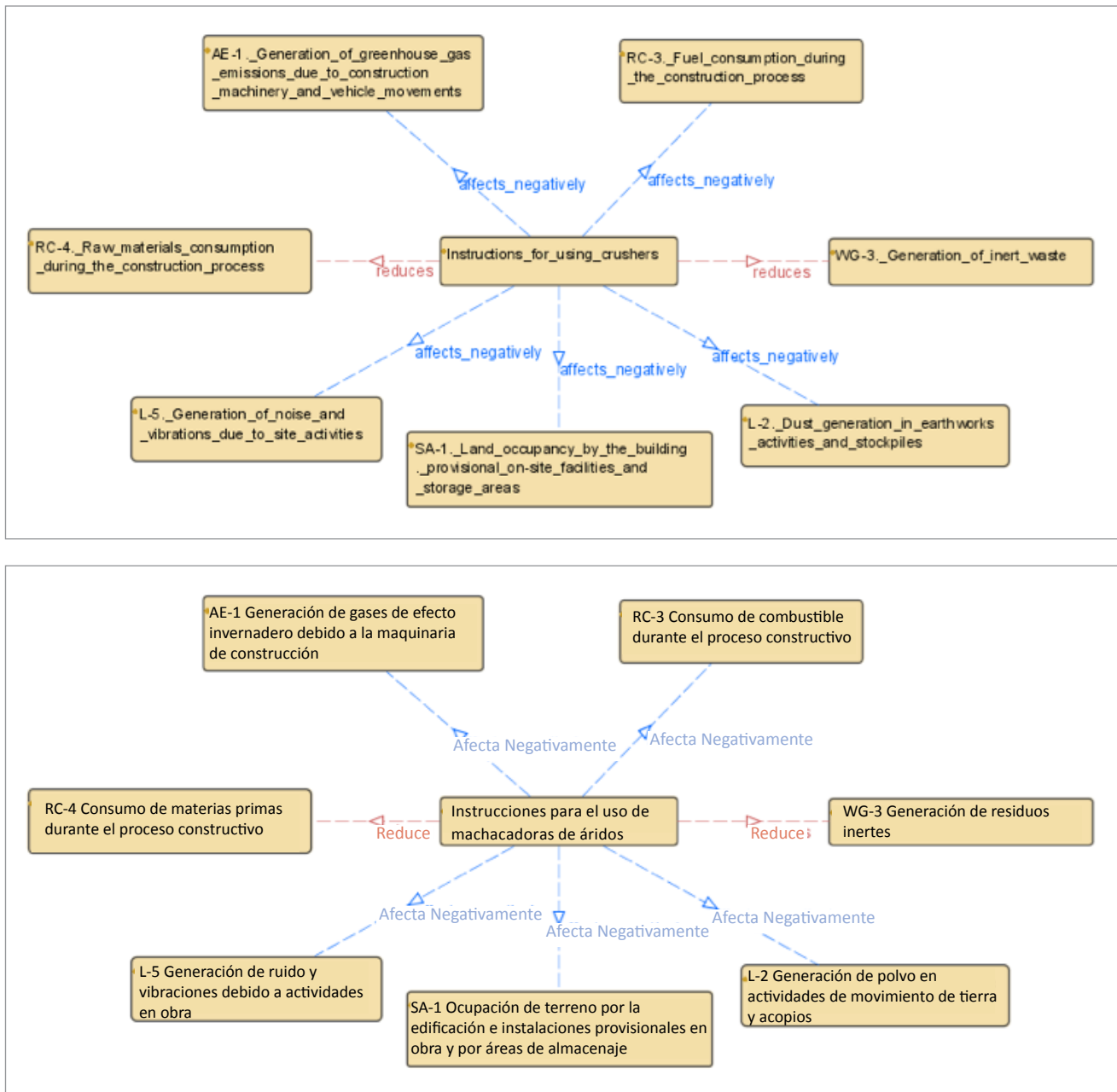


Figure 13. Identification of environmental impacts and health and safety risks related to the work instruction 'instructions for using crushers'

Figura 13. Identificación de impactos ambientales y riesgos de seguridad y salud relacionados con la instrucción de trabajo "instrucciones para el uso de machacadoras de áridos"

5. Conclusiones

Este estudio da un paso esencial en la formalización del marco teórico necesario para estimular la implementación de sistemas integrados de gestión ambiental y de seguridad y salud en empresas constructoras, a través del control operacional integrado. El principal resultado es la obtención de un enfoque innovador para clarificar y representar el conocimiento relacionado con el control operacional integrado del medio ambiente, y la seguridad y la salud en obra, mediante el desarrollo de un enfoque basado en la ontología.

5. Conclusions

This study takes an essential step in formalizing the theoretical framework needed to enhance the implementation of integrated environmental and health and safety management systems in construction companies through integrated operational control. The main outcome is to provide an innovative approach for clarifying and representing the knowledge related to on-site integrated environmental and health and safety operational control through the development of an ontology-based approach.

El mapa ontológico permite una mejor comprensión de las consideraciones prácticas relacionadas con la gestión ambiental y de seguridad y salud, y permite considerar sistemáticamente la relación entre los procesos constructivos, impactos ambientales, riesgos de seguridad y salud e instrucciones de trabajo. La representación y la gestión la estructura del conocimiento relacionada con la gestión ambiental y de seguridad y salud en obra las permite compartir el conocimiento y reutilizarlo entre los expertos y partes interesadas que están simultáneamente involucradas en una obra en construcción. El enfoque basado en ontología también puede ayudar a abordar la dicotomía existente entre el conocimiento tácito y explícito. El enfoque basado en ontología identifica las instrucciones de trabajo en obra que deberían ser implementadas, ya sea para evitar un posible impacto ambiental o riesgo de seguridad y salud antes de que éste ocurra, o para minimizar su efecto negativo cuando tiene lugar. La fortaleza de esta solución se basa en el hecho de que las potenciales interferencias son subrayadas. Así el efecto de una determinada instrucción de trabajo en obra, sobre todo el conjunto de impactos ambientales y riesgos de seguridad y salud. Otra característica clave del enfoque basado en ontología es la identificación del momento en el que se deben implementar las correspondientes instrucciones de trabajo en obra, revisando la lista de procesos constructivos relacionados, en los cuales puede ocurrir un incidente. El enfoque basado en ontología también relaciona los impactos ambientales y los riesgos de seguridad y salud que tienen lugar en un determinado proceso constructivo.

Futuros estudios deberían implementar esta solución en un sistema web. La implementación de este enfoque en un ambiente más amigable ofrecería una orientación útil sobre gestión integrada de muchas de las incidencias ambientales, de seguridad y salud en las obras de construcción a los contratistas. En este caso, el enfoque basado en ontología para la gestión integrada ambiental y de la gestión integrada ambiental y de seguridad y salud podría utilizarse como el marco para que los contratistas pudieran gestionar de forma efectiva los impactos ambientales y riesgos de seguridad y salud durante sus proyectos de construcción y respaldar la implementación de medidas de control necesarias para reducir los riesgos de seguridad y salud e impactos ambientales hasta un nivel aceptable. Con el fin de estimular la futura reutilización y difusión del conocimiento, el enfoque basado en ontología para la gestión integrada ambiental, de seguridad y salud, podría ser vinculado a las ya existentes y validadas ontologías y taxonomías dentro del dominio de la construcción. Podría realizarse un mapeo completo con el objetivo de establecer las relaciones apropiadas entre los conceptos ya incluidos en los estándares validados para procesos constructivos y sus equivalentes del enfoque basado en ontología para la gestión integrada del medio ambiente y de la seguridad y la salud. La igualación semántica, aunque laboriosa e intensiva, proporcionaría una forma de integrar el enfoque basado en ontología con otras ontologías basadas en estándares validados.

The ontological map allows us to gain a better understanding of practical considerations of on-site environmental and health and safety management, and to systematically consider the relation between construction processes, environmental impacts, health and safety risks and work instructions. Representing and managing the structure of knowledge related to integrated on-site environmental and health and safety management enables knowledge sharing and reuse among domain experts and the stakeholders who are simultaneously involved in a construction site. The ontology-based approach may also help to address the existing dichotomy between tacit and explicit knowledge. The ontology-based approach identifies the on-site work instructions that should be implemented to either avoid a possible environmental impact or health and safety risk before it occurs or minimize its negative effect when it does take place. The strength of the solution lies in the fact that potential inferences are highlighted. Thus, the effect of any particular on-site work instruction on the whole set of environmental impacts and health and safety risks is included within the approach. Another key feature of the ontology-based approach is the identification of when corresponding on-site work instructions should be implemented. This is achieved by reviewing the list of related construction processes in which the incident may take place. The ontology-based approach also relates the environmental impacts and health and safety risks that take place during a particular construction process.

Future studies should implement the ontology-driven solution in a web-based system. The implementation of this approach in a friendlier environment would offer handy guidance to contractors on the integrated management of many of the environmental and health and safety incidences at the construction site. In this case, the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management could be used as a framework for contractors to effectively manage environmental impacts and health and safety risks during the construction of their projects, and to provide support in particular on the implementation of necessary control measures to lower health and safety risks and environmental impacts to an acceptable level. To enhance future knowledge reuse and shareability, the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management could be linked to existing validated ontologies or taxonomies within the construction domain. Complete mapping could be executed by establishing proper relationships between concepts that are already included in validated standards for construction processes and their counterparts in the ontology-based approach for on-site integrated environmental and health and safety management. Although labour-intensive, semantic matching would provide a means of integrating the ontology-based approach into other ontologies that are based on validated standards.



6. Referencias/References

- Anumba C.J., Issa R.R.A., Pan J. and Mutis I. (2008a)**, Collaborative project information management in a semantic web environment. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 15(1), 78-94.
- Anumba C.J., Issa R.R.A., Pan J. and Mutis I. (2008b)**, Ontology-based information and knowledge management in construction. *Construction Innovation: Information, Process, Management*, 8(3), 218-239.
- Anumba C.J., Ugwu O.O., Newnham L., Thorpe A. (2002)**, Collaborative design of structures using intelligent agents. *Automation in Construction*, 11(1), 89-103.
- Construccions Rubau, Centre de Seguretat i Condicions de Salut en el Treball, ASEPEYO, (2007)**, La prevenció de riscos laborals en el sector de la construcció. Barcelona: Generalitat de Catalunya, Departament de Treball.
- DAML [on-line] (2010)**, DAML ontology library [Accessed on 22 February 2010]. Available at: <<http://www.daml.org/ontologies/>>.
- Darlington M.J., Culley S.J. (2008)**, Investigating ontology development for engineering design support. *Advanced Engineering Informatics*, 22(1), 112-134.
- Edum-Fotwe F.T., Price A.D.F. (2009)**, A social ontology for appraising sustainability of construction projects and developments. *International Journal of Project Management*, 27(4), 313-322.
- El-Diraby T.A., Lima C., Feis B. (2005)**, Domain Taxonomy for construction concepts: toward a formal ontology for construction knowledge. *Journal of computing in civil engineering*, 19(4), 394-406.
- El-Gohary N.M., El-Diraby T.E. (2010)**, Domain ontology for processes in infrastructures and construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(7),730-744.
- Gangolells M., Casals M., Forcada N., Roca X., Fuertes A. (2010)**, Mitigating construction safety risks using prevention through design. *Journal of Safety Research*, 41(2), 107-122.
- Gangolells M., Casals M., Gassó S., Forcada N., Roca X., Fuertes A. (2009)**, A methodology for predicting the severity of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. *Building and Environment*, 44(3), 558-571.
- Gangolells M., Casals M., Gassó S., Forcada N., Roca X., Fuertes A. (2011)**, Addressing concerns of interested parties when predicting the significance of environmental impacts related to the construction process of residential buildings. *Building and Environment*, 46(3), 1023-1037.
- Garcia A.C.B., Kunz J., Ekstrom M., Kiviniemi A. (2004)**, Building a project ontology with extreme collaboration and virtual design and construction. *Advanced Engineering Informatics*, 18(2), 71-83.
- Gremio de Constructores de Obras de Barcelona y Comarcas (2007)**, RECONS-Reducing environmental construction impact. Technical work instructions (non-published material).
- Griffith A., Stephenson P., Watson P. (2000)**, Management systems for construction. Harlow: Longman.
- Gruber T. A. (1993)**, Translation approach to portable ontologies. *Knowledge Acquisition*, 5(2), 199-220.
- Issa R. R. A., Mutis I. (2006)**, Ontology Based Framework Using a Semantic Web for Addressing Semantic Reconciliation in Construction. *Intelligent Computing in Engineering and Architecture*. Berlin: Springer.
- ITeC [on-line] (2006)**, Metabase database [accessed on 25 September 2006]. Available at: <<http://www.itec.es/noubedec.c/bedec.aspx>>.
- Jørgensen T.H., Remmen A., Mellado M.D. (2006)**, Integrated management systems – three different levels of integration. *Journal of Cleaner Production*, 14(8), 713-722.
- KSL [on-line] (2010)**, Ontolingua library [Accessed on 20 February 2010]. Available at: <<http://www.ksl.stanford.edu/software/ontolingua/>>.
- Labodová A. (2004)**, Implementing integrated management systems using a risk analysis based approach. *Journal of Cleaner Production*, 12(6), 571-580.
- Lima C., Sarli A., Storer G. (2007)**, Controlled vocabularies in the European construction sector: evolution, current developments, and future trends. London: Springer-Verlag.
- Noy N., McGuinness D. L. (2001)**, Ontology Development 101: A guide to Creating your First Ontology. Stanford Knowledge Systems Laboratory, Technical Report KSL-01-05 and Stanford Medical Informatics, Technical Report SMI-2001-0880.
- Pandit A., Zhu Y. (2007)**, An ontology-based approach to support decision-making for the design of ETO (Engineer-To-Order) products. *Automation in Construction*, 16(6), 759-770.
- Pheng L.S., Shiua S.C. (2000)**, The maintenance of construction safety: riding on ISO 9000 quality management systems. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 6(1), 28-44.
- Project Management Institute (2009)**, A guide to the project management body of knowledge: PMBOK guide. Fourth edition. Pennsylvania: Project Management Institute, Inc.
- Salomone R. (2008)**, Integrated management systems: experiences in Italian organizations. *Journal of Cleaner Production*, 16(16), 1786-1806.
- Seiffert M.E.B. (2008)**, Environmental impact evaluation using a cooperative model for implementing EMS (ISO 14001) in small and medium-sized enterprises. *Journal of Cleaner Production*, 16(14), 1447-1461.
- Skolick Z., Kicing R. (2002)**, Intelligent agent for designing steel skeletal structures of tall buildings. Proceedings of ASCE International Workshop on Information Technology in Civil Engineering, Washington, USA, 2-3 November 2002.

- Staub-French S., Fischer M., Kunz J., Paulson B. (2003)** An ontology for relating features with activities to calculate costs. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 17(4), 243-254.
- Tserng H.P., Yin S.Y.L., Dzung R.J., Wou B., Tsai M.D., Chen W.Y. (2009)**, A study of ontology-based risk management framework of construction projects through project life cycle. *Automation in Construction*, 18(7), 994-1008.
- Ugwu O.O., Anumba C.J., Thorpe A. (2005)**, Ontological foundations for agent support in constructability assessment of steel structures - a case study. *Automation in Construction*, 14(1), 99-114.
- Yurchyshyna A., Zarli A. (2009)**, An ontology-based approach for formalization and semantic organization of conformance requirements in construction. *Automation in Construction*, 18(8), 1084-1098.
- Zeng S.X., Shi J.J., Lou G.X. (2007)**, A synergetic model for implementing an integrated management system: an empirical study in China. *Journal of Cleaner Production*, 15(18), 1760-1767.
- Zeng S.X., Tam V.W.Y., Tam C.M. (2008)**, Towards occupational health and safety systems in the construction industry of China. *Safety Science*, 46(8), 1155-1168.
- Zeng S.X., Tian P., Shi J. (2005)**, Implementing integration of ISO 9001 and ISO 14001 for Construction. *Managerial Auditing Journal*, 20(4), 394-407.
- Zutshi A. (2005)** Integrated management system. The experiences of three Australian organizations. *Journal of Manufacturing Technology*, 16(2), 211-232.