



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

**EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE USO  
DE BUILDING INFORMATION  
MODELING (BIM) PARA APOYAR LA  
MANTENCIÓN DE ENVOLVENTES  
VERDES**

**FIONA EVA RUCKERT ZOELLNER**

Tesis para optar al grado de  
Magíster en ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor:  
**CLAUDIO ENRIQUE MOURGUES ÁLVAREZ**

Santiago de Chile, diciembre, 2017

© 2017, Fiona Eva Ruckert Zoellner



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERIA

# **EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE USO DE BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) PARA APOYAR LA MANTENCIÓN DE ENVOLVENTES VERDES**

**FIONA EVA RUCKERT ZOELLNER**

Tesis presentada a la Comisión integrada por los profesores:

**CLAUDIO MOURGUES**

**SERGIO VERA**

**MAURICIO TOLEDO**

**YADRAN ETEROVIC**

Para completar las exigencias del grado de  
Magíster en ciencias de la Ingeniería  
Santiago de Chile, diciembre, 2017

A mi padre. Gracias por mi  
educación.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer principalmente al profesor Claudio Mourgues por brindarme la oportunidad de realizar mi tesis en el tema que más ha influenciado en mi vida, la sustentabilidad. También a mi familia por apoyarme durante todo este proceso, especialmente a mi mamá por haber estado en todos los momentos de mi vida. También me gustaría agradecerle a Andrés Vergara, por brindarme calma y tenerme paciencia. Y por último, agradecer a Carlos Durán, Manuel Feliú, María Fernanda Gómez, Alan Israel y José Manuel Lobos por su apoyo y colaboración durante el proceso de esta investigación.

## INDICE GENERAL

	Pág.
DEDICATORIA.....	ii
AGRADECIMIENTOS .....	iii
INDICE DE TABLAS .....	vi
INDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	viii
ABSTRACT .....	ix
1. Introducción.....	1
1.1 Definición del problema.....	4
1.2 Hipótesis.....	4
1.3 Objetivo general .....	4
1.4 Objetivos específicos.....	4
1.5 Alcance.....	5
1.6 Metodología de Investigación .....	5
1.7 Estructura de la tesis.....	6
2. Evaluación de los procesos de mantención de envolventes verdes .....	8
2.1 Introducción .....	9
2.2 Tipo de envolventes verdes .....	10
2.3 Principales procesos para la mantención de envolventes verdes .....	12
2.4 Metodología de investigación .....	14
2.5 Formalizando procesos de mantenimiento – Entrevistas a expertos.....	15
2.6 KPI para el mantenimiento de envolventes verdes - propuesta y aplicación	17
2.7 Conclusiones .....	32
3. Evaluación del potencial de uso de building information modeling (BIM) para apoyar la mantención de envolventes verdes.....	35
3.1 Introducción .....	36
3.2 BIM para la gestión de instalaciones.....	37
3.3 Modelos de datos en BIM .....	39

3.4	Procesos de mantenimiento de envoltentes verdes.....	41
3.5	Metodología de investigación .....	43
3.6	Formalización requerimientos de información para la mantención de envoltentes verdes .....	43
3.7	Evaluación requerimientos de información mantención de envoltentes verdes 47	
3.8	Conclusiones .....	60
4.	Conclusiones y recomendaciones .....	63
	<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>65</b>

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2-1: Estadísticas de desempeño envolventes verdes .....	23
Tabla 3-1: Requerimientos de información propuestos para la mantención de envolventes verdes. ....	44
Tabla 3-2: Requerimientos de información encontrados en IFC para soporte estructural y sistema de impermeabilización .....	50
Tabla 3-3: Requerimientos de información encontrados en IFC para sistema de riego .....	51
Tabla 3-4: Requerimientos de información encontrados en IFC para acceso a la envolvente .....	53
Tabla 3-5: Requerimientos de información encontrados en IFC para acceso sistema vegetal .....	54
Tabla 3-6: MVD propuesto para sistema estructural y riego .....	57
Tabla 3-7: MVD propuesto para sistemas de impermeabilización y vegetal y acceso a la envolvente .....	59

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1-1: Diagrama del proceso de investigación.....	5
Figura 2-1: Clasificación envolventes verdes – elaboración propia .....	12
Figura 2-2: Satisfacción general de los usuarios con el mantenimientos de las envolventes verdes. ....	28
Figura 2-3: Impacto en la imagen del usuario debido a las envolventes verdes. ....	28
Figura 2-4: Percepción de los usuarios en la interferencia de la edificación debido al mantenimiento de la envolvente verde.....	29
Figura 2-5: Horas de interferencia total en un mes en la edificación debido a la mantención de la envolvente verde.....	29
Figura 2-6: Impactos psicológico y sociológico en los usuarios debido a la envolvente verde.....	30
Figura 2-7: Percepción del consumo de agua de los usuarios debido al mantenimiento de la envolvente verde. ....	30

## RESUMEN

La incorporación de envolventes verdes es una de las estrategias con que el sector de la edificación está buscando mejorar su sustentabilidad. Gran parte de la literatura se enfoca principalmente en el diseño de éstas y sus beneficios para el desempeño del edificio, dejando aún bastante desconocimiento sobre las métricas de los procesos de mantenimiento de las envolventes verdes. Es en esta etapa donde mucha literatura señala que se produce la mayor cantidad de los costos del ciclo de vida de un proyecto.

Por otro lado, las metodologías BIM (Building Information Modeling) presentan una oportunidad para mejorar los procesos en la fase de mantención y operación de una infraestructura. Sin embargo, aún existe desconocimiento de la información presente en los modelos BIM que podría ser relevante para apoyar procesos de esta fase. En particular, el mantenimiento de envolventes verdes presenta interesantes condiciones al incluir elementos vivos (estructura vegetal) y porque sus procesos son típicamente realizados por organismos externos al operador de la infraestructura.

Esta investigación formaliza los procesos de mantención de envolventes verdes y en base a éstos identifica los principales requerimientos de información para estos procesos. Finalmente, se analiza si el estándar de modelo de datos detrás de BIM contiene dichos requerimientos de información.

Los resultados incluyen la identificación de los procesos de mantenimiento de envolventes verdes, un conjunto de indicadores para su control y seguimiento, los requerimientos de información BIM para apoyar los procesos identificados, y la evaluación del potencial actual del modelo de datos detrás de BIM para apoyar esos procesos de mantenimiento.

Palabras Claves: BIM, IFC, Envolventes verdes, Mantención

## **ABSTRACT**

The incorporation of green envelopes is one of the strategies with which the edification sector is seeking to improve its sustainability. Most of the literature focuses mainly on the design of these and its benefits on the performance of the building, leaving still the metrics of maintenance processes of green envelopes quite unknown. It is at this stage that a lot of literature points out of the great amount of costs involved in the project life cycle.

On the other hand, BIM (Building Information Modeling) methodologies present an opportunity to improve processes in the maintenance and operation phase of an infrastructure. However, there is still ignorance of the information present in the BIM models that could be relevant to support processes of this phase. In particular, the maintenance of green envelopes presents interesting conditions when including living elements (plant structure) and because their processes are typically carried out by external agents to the facility management.

This research formalizes the maintenance processes of green envelopes and, based on these, identifies the main information requirements for these processes. Finally, it analyzes if the standard data model behind BIM contains said information requirements.

The results include the identification of green envelope maintenance processes, a set of performance indicators for their control and monitoring, the BIM information requirements to support the identified processes, and the evaluation of the potential of the current data model behind BIM to support these maintenance processes.

Keywords: BIM, IFC, Green envelopes, Maintenance

## **1. INTRODUCCIÓN**

El sector de la edificación es uno de los mayores usuarios de energía y de recursos naturales. Además, es responsable del 40% del consumo de los materiales que son introducidos a la economía global y genera 40-50% del output global de los gases efecto invernadero y de los agentes de lluvia ácida (Asif, Muneer, & Kelley, 2007). Debido a esto, el sector de la edificación está enfrentando un gran cambio para poder cumplir con los requerimientos sustentables que los gobiernos están introduciendo (Sodagar & Fieldson, 2007). Una de las estrategias alineadas con este propósito es la incorporación de muros y techos verdes (también denominados muros y techos sustentables). Estos últimos han penetrado el mercado en los últimos 100 años y se han convertido en un elemento clave para las áreas urbanas (Li & Yeung, 2014). Lo anterior se debe a que las envolventes verdes (muros y techos) entregan beneficios ambientales, ecológicos, sociológicos y económicos (Getter & Rowe, 2006) tales como la mitigación de agua pluviales, refrigeración pasiva de edificios e incluso de ciudades, aumento de la biodiversidad (Magill, Midden, Groninger, & Therrell, 2011), mejora de la calidad del aire y reducción de la contaminación atmosférica debido principalmente a la disminución de los niveles de polvo fino (Perini, Ottelé, Haas, Raiteri, & Ungers, 2011). Para que dichos beneficios de las envolventes verdes sigan siendo percibidos a lo largo del ciclo de vida de la edificación, es necesario mantener estos techos y muros sustentables. Sin embargo, se ha encontrado escasa literatura que aborde la etapa de mantenimiento cabalmente y que presente métricas o indicadores de esta. En cambio, se ha enfocado en sus aspectos de diseño (Aziz & Ismail, 2011; MacIvor & Lundholm,

2011; Sailor, 2008) y en los beneficios de dichas envolventes, especialmente en las áreas de eficiencia energética y ambiental (Banting, Doshi, Li, & Missious, 2005; Bianchini & Hewage, 2012; Clark, Adriaens, & Talbot, 2008; Fioretti, Palla, Lanza, & Principi, 2010; Jaffal, Ouldboukhitine, & Belarbi, 2012; Niu, Clark, Zhou, & Adriaens, 2010; Peck, Callaghan, Kuhn, & Bass, 1999; Pérez, Rincón, Vila, González, & Cabeza, 2011; Perini & Rosasco, 2013; Speak, Rothwell, Lindley, & Smith, 2013; Veisten et al., 2012).

Por otro lado, varias investigaciones se han enfocado en los beneficios de utilizar la metodología BIM (Building Information Modelling) en la fase de gestión de instalaciones (Becerik-Gerber, Jazizadeh, Li, & Calis, 2012; Dong, O'Neill, & Li, 2014; Eastman, Teicholz, Sacks, & Liston, 2011; Motawa & Almarshad, 2013; Schley, Teicholz, & Lewis, 2013). BIM integra información del edificio en un modelo 3D para apoyar los distintos procesos durante todo el ciclo de vida del proyecto, particularmente durante la fase de mantenimiento. Dicho apoyo de BIM en la gestión de instalaciones puede ser utilizada por los dueños de la infraestructura, o por agentes externos que son subcontratados. Un ejemplo del último caso es la mantención de envolventes verdes, en donde los dueños de la infraestructura subcontratan a empresas para realizar la mantención de techos y muros verdes.

Existe variada literatura que abarca la gestión de instalaciones apoyada por BIM por parte de los dueños, usuarios y encargados de mantención de las instalaciones. Específicamente en los ámbitos relacionados a: productividad de costos y tiempos, eficiencia energética, requerimientos de información, sustentabilidad de la infraestructura, gestión de documentos e información, interoperabilidad con teléfonos

inteligentes, encuentro de fallas y causantes de ellas en el edificio y metodologías para compartir información del edificio de manera más eficiente (Arayici, Onyenobi, & Egbu, 2012; Becerik-Gerber et al., 2012; Bonenberg & Wei, 2015; Giulia Carbonari & Jones, 2014; E. W. East, Nisbet, & Liebich, 2012; Kim, Lim, Kim, & Kim, 2013; Liu & Issa, 2013; Motamedi, Hammad, & Asen, 2014; Shen, Hao, & Xue, 2012; Vanlande, Nicolle, & Cruz, 2008; Wong & Zhou, 2015). Pese a lo anterior, aún no ha habido una discusión que aborde la mantención de envolventes verdes y BIM y no se ha orientado a la indagación en el uso de BIM por parte de agentes externos, como lo son las personas que realizan la mantención de las envolventes verdes en edificaciones. Por lo que existe falta de conocimiento sobre qué requerimientos de información son necesarios para poder utilizar BIM en la mantención de las envolventes verdes, específicamente los requisitos necesarios para el modelo de base de datos que utiliza BIM, el cual se denomina IFC (Industry Foundation Classes) y sobre procesos de mantención que son realizados por agentes externos a la infraestructura. Debido a lo anterior, una oportunidad interesante es analizar si BIM contiene la información necesaria para apoyar y gestionar eficientemente los procesos de mantención de las envolventes verdes y de abrir la discusión sobre mantenciones en edificaciones que son realizados por agentes que no están directamente relacionados con la operación y mantención de la infraestructura.

### **1.1 Definición del problema**

Existe una falta de conocimiento respecto a los requerimientos de información relevante para poder apoyar procesos de mantenimiento de envolventes verdes y la capacidad de BIM de incorporar esa información.

### **1.2 Hipótesis**

BIM posee la capacidad para apoyar los procesos de mantención de envolventes verdes.

### **1.3 Objetivo general**

Evaluar el modelo de datos de BIM respecto a su capacidad para apoyar los procesos de mantención de las envolventes verdes.

### **1.4 Objetivos específicos**

- i. Formalizar los procesos necesarios para mantener adecuadamente los techos y muros verdes.
- ii. Proponer y aplicar indicadores de desempeño de mantención a varios proyectos de envolventes sustentables.
- iii. Identificar los principales requerimientos de información para los procesos de mantención de envolventes verdes.
- iv. Evaluar la capacidad del modelo de datos BIM para apoyar los procesos de mantención de las envolventes verdes.

- v. Proponer un intercambio de información entre BIM y un sistema de información para la mantención de envolventes verdes.

### 1.5 Alcance

Las principales limitaciones de la investigación fueron la temporalidad en que se aplicaron los KPI (durante una temporada de primavera) y la falta de información estructurada por parte de los contratistas de mantenimiento de las envolventes verdes.

### 1.6 Metodología de Investigación

La metodología utilizada en esta investigación consta de dos partes, la cual se expone a continuación en la Figura 1-1.

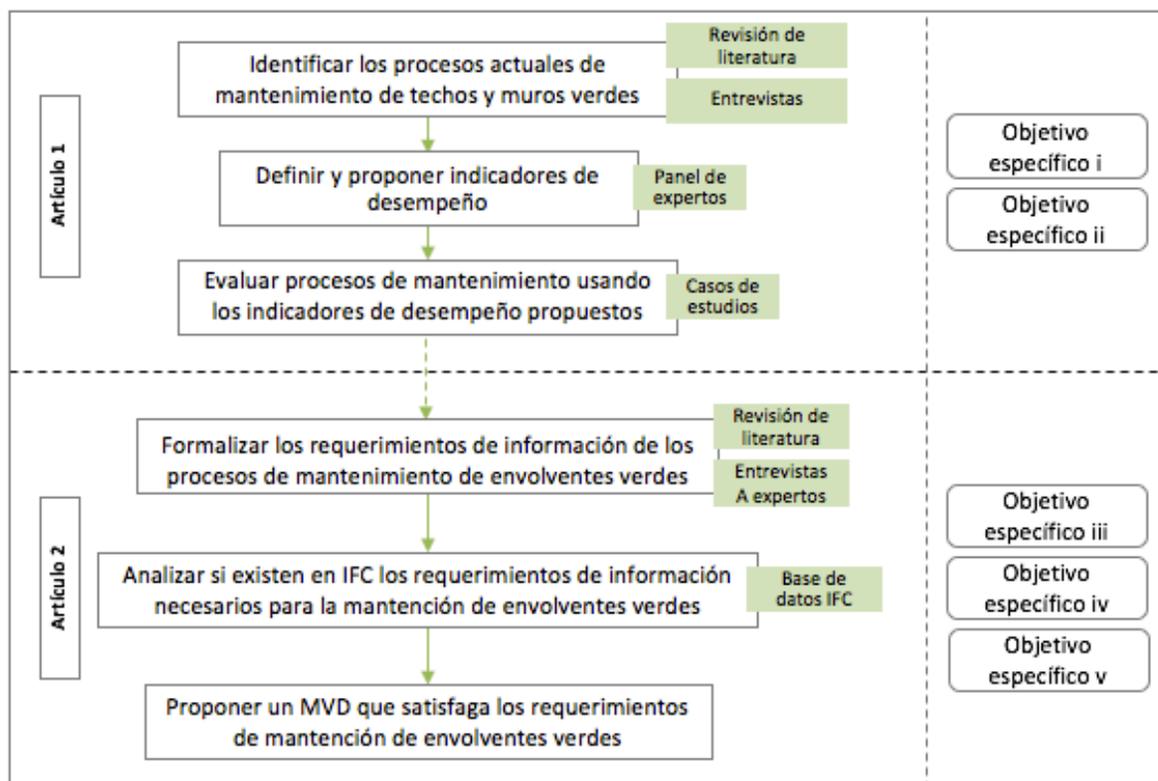


Figura 1-1: Diagrama del proceso de investigación

La primera parte de la investigación consistió en identificar los procesos de mantenimiento de las envolventes verdes. Para lo anterior se realizó una extensa y minuciosa revisión de literatura que además fue complementada con entrevistas a expertos en la mantención de envolventes verdes. Una vez identificados los procesos de mantenimiento, se prosiguió a definir y proponer indicadores de desempeño para la mantención de envolventes verdes con un panel de expertos. Luego se aplicaron dichos indicadores a 12 proyectos de techos y muros verdes y se evaluaron los procesos de mantenimiento y se obtuvieron datos cuantitativos y cualitativos acerca de éstos.

La segunda parte tuvo por objetivo formalizar los requerimientos de información necesarios para los procesos de mantención de las envolventes verdes a través del estado del arte. Una vez formalizado los requerimientos, se procedió a comparar si estos estaban presentes en el modelo de datos IFC. Por último, se propuso un MVD (*Model View Definition*) que satisficiera los requerimientos de información de los procesos de mantenimiento de envolventes verdes.

## **1.7 Estructura de la tesis**

Esta tesis se estructura en base a los 2 artículos científicos que fueron generados a partir de la investigación. El documento incluye estos dos artículos precedidos por una introducción y continuados por el capítulo de conclusiones generales. El primer capítulo (introducción) define el problema, hipótesis, objetivos, alcance y metodología de la investigación. Luego, el capítulo 2 corresponde al primer artículo en donde se investiga y clasifica los procesos de mantención de las envolventes verdes para luego proponer

indicadores de desempeño que fueron aplicados a varios proyectos. El capítulo 3 (segundo artículo) tiene por objetivo evaluar si las metodologías BIM tienen el potencial para apoyar la mantención de envolventes verdes al verificar se los requerimientos de información necesarios para la mantención de envolventes verdes se encuentran dentro del modelo de datos BIM. Finalmente, el capítulo 4 consta de un cierre a la investigación en donde se plantean las conclusiones de los 2 artículos científicos y las recomendaciones a seguir en el futuro.

## **2. EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE MANTENCIÓN DE ENVOLVENTES VERDES**

La incorporación de envolventes verdes es una de las estrategias con que el sector de la edificación está buscando mejorar su sustentabilidad. La literatura se enfoca principalmente en el diseño de éstas y sus beneficios para el desempeño del edificio, sin embargo aún no existen métricas ni indicadores sobre sus procesos de mantenimiento. Esta investigación identifica y caracteriza los principales procesos necesarios para la mantención de las envolventes verdes a través de una revisión del estado del arte, entrevistas a expertos y la definición y aplicación de indicadores de desempeño en 12 proyectos de muros y techos verdes. Los resultados muestran que los mandantes instalan las envolventes verdes como una estrategia de marketing y no se ven mayormente involucrados en la mantención, pero sí se sienten conformes con la mantención realizada por las empresas externas. Por otro lado, las empresas que realizan la mantención no tienen un seguimiento adecuado ni datos cuantitativos de dichos procesos por lo que el desempeño es medido subjetivamente. Respecto a la aplicación de los indicadores de desempeño, los resultados indican que los muros verdes tienen mayores costos unitarios, consumo de mano de obra, tasa de control rutinario y tasa de reposición de plantas promedio mensuales por metro cuadrado en comparación con los techos verdes. Contrario a lo esperado, se encontraron pocas correlaciones entre los indicadores análogos en las áreas de costos y consumo de mano de obra.

Palabras clave: Envolventes verdes, Mantención, Indicadores de desempeño.

## 2.1 Introducción

El sector de la edificación es uno de los mayores usuarios de energía y de recursos naturales. Además, es responsable del 40% del consumo de los materiales que son introducidos a la economía global y genera 40-50% del output global de los gases efecto invernadero y de los agentes de lluvia ácida (Asif et al., 2007). Debido a esto, el sector de la edificación está enfrentando un gran cambio para poder cumplir con los requerimientos sustentables que los gobiernos están introduciendo (Sodagar & Fieldson, 2007). Una de las estrategias alineadas con este propósito es la incorporación de muros y techos verdes (también denominados muros y techos sustentables). Estos últimos han penetrado el mercado en los últimos 100 años y se han convertido en un elemento clave para las áreas urbanas (Li & Yeung, 2014). Lo anterior se debe a que las envolventes verdes (muros y techos) entregan beneficios ambientales, ecológicos, sociológicos y de costos (Getter & Rowe, 2006) tales como la mitigación de agua pluviales, refrigeración pasiva de edificios e incluso de ciudades, aumento de la biodiversidad (Magill et al., 2011), mejora de la calidad del aire y reducción de la contaminación atmosférica debido principalmente a la disminución de los niveles de polvo fino (Perini et al., 2011).

El foco de la literatura sobre envolventes verdes ha estado en aspectos de diseño (Aziz & Ismail, 2011; MacIvor & Lundholm, 2011; Sailor, 2008) y los beneficios de dichas envolventes, espacialmente en el ámbito de la eficiencia energética y ambiental (Banting et al., 2005; Bianchini & Hewage, 2012; Clark et al., 2008; Fioretti et al., 2010; Jaffal et al., 2012; Niu et al., 2010; Peck et al., 1999; Pérez et

al., 2011; Perini & Rosasco, 2013; Speak et al., 2013; Veisten et al., 2012). Sin embargo, la literatura escasamente aborda la etapa de mantenimiento. Incluso, Luckett (2009) destaca que se ha instaurado la idea que dichas envolventes “no necesitan de riego” o que “no requieren de mantención”. Lo anterior es un grave error de concepto ya que éstas necesitan de mantención rutinaria para así poder seguir operando en su máxima eficiencia. En la misma línea, Silva et al. (2015) recalcan que existen varios documentos técnicos que definen la necesidad de un diseño preciso y que predicen las acciones de mantención para techos verdes pero que aún es inusual encontrar un plan de mantenimiento detallado.

El presente estudio busca evaluar los distintos procesos necesarios para poder mantener adecuadamente los techos y muros verdes, para lo cual la investigación formaliza estos procesos, y luego propone y testea indicadores de desempeño (KPI – *Key Performance Indicators*) en varios proyectos de envolventes verdes en Chile.

El primer paso para lograr los objetivos anteriores es entender los distintos tipos de soluciones de las envolventes verdes y qué investigaciones se han realizado sobre el mantenimiento de éstas.

## **2.2 Tipo de envolventes verdes**

Los techos verdes pueden ser clasificados en intensivos, semi-intensivos y extensivos (Li & Yeung, 2014). La diferencia entre ellos es la vegetación que poseen y el medio sólido que requieren para mantener el crecimiento de las

plantas. Los techos extensivos generalmente tienen plantas *sedum* y hojas *suculentas* las cuales se caracterizan por necesitar una capa fina de suelo orgánico (específicamente entre 2 a 20 centímetros de profundidad) de medio para crecer, y poca mantención y cuidado. En contraste, los techos intensivos pueden contener arbustos, árboles pequeños, matorrales y céspedes que necesitan de un medio sólido de mayor profundidad (específicamente de entre 15 a 200 centímetros). Los techos semi-intensivos se encuentran entremedio de las características de los intensivos y los extensivos y necesitan un medio sólido de entre 12 a 100 centímetros para el crecimiento de sus plantas (Li & Yeung, 2014).

Las murallas verdes pueden ser clasificadas en fachadas verdes y sistemas de murallas vivas. Cabe destacar que en la literatura es común encontrar la denominación de fachadas verdes en vez de envolventes verdes, lo cual genera confusión dado que fachada también es usado para una subcategoría de murallas verdes. Las fachadas verdes tienen plantas trepadoras y colgantes y a su vez se subdividen en fachadas verdes directas (también llamadas tradicionales) e indirectas. Estas últimas pueden ser enrejados modulares o guías continuas que necesita de una estructura de soporte para la vegetación (Manso & Castro-Gomes, 2014). Por otra parte, los sistemas de murallas vivas son catalogados en continuas y modulares. Las continuas son construidas a base de pantallas ligeras y permeables en las cuales las plantas son insertadas individualmente. En contraste, las murallas vivas modulares son bandejas, vasijas, baldosas plantadoras y sacos permeables los cuales incluyen los sustratos de cultivo en los cuales la planta puede crecer (Manso & Castro-Gomes, 2014).

A continuación, en la Figura 2-1 se presenta el sistema de clasificación de envolventes verdes.

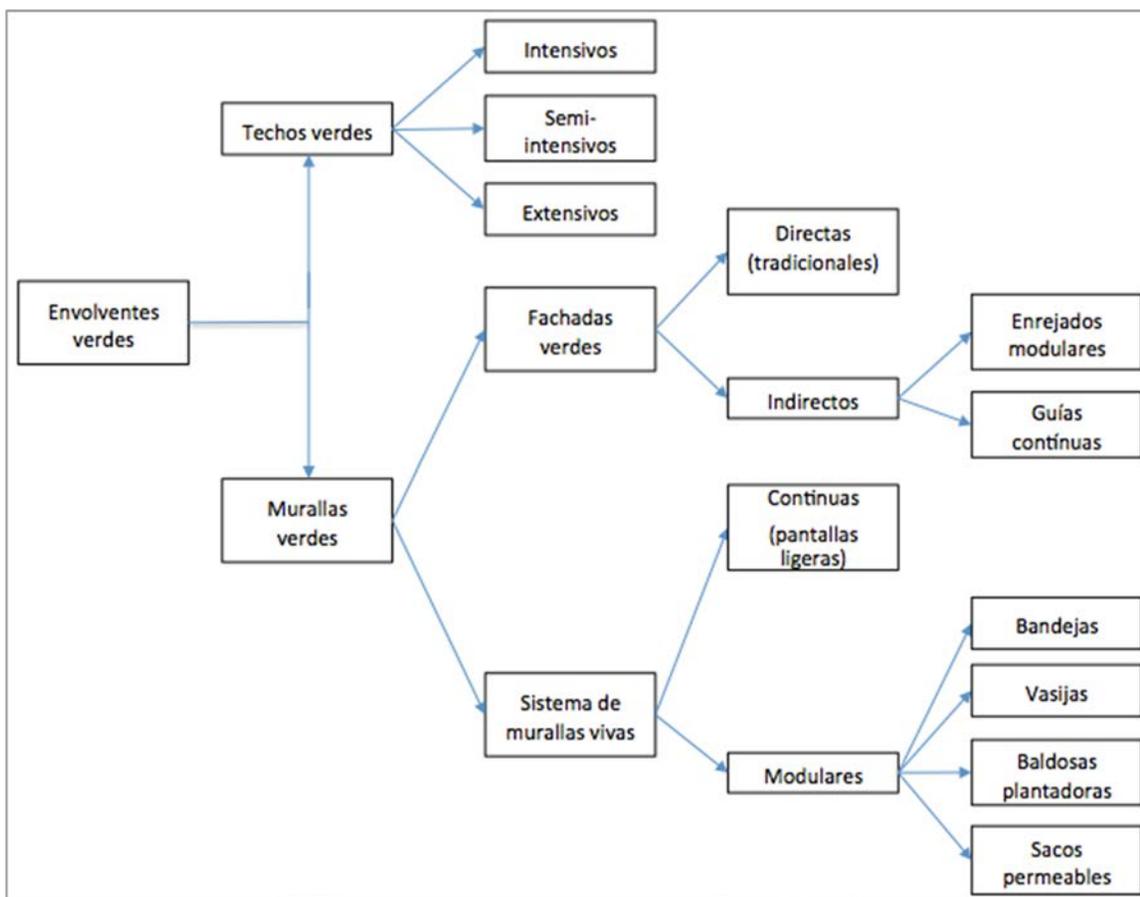


Figura 2-1: Clasificación envolventes verdes – elaboración propia

### 2.3 Principales procesos para la mantención de envolventes verdes

Luckett (2009) menciona un conjunto bastante completo de tareas de mantención de muros y techos sustentables.

- Mantener el acceso a la envolvente verde.

- Cobijar en base a geo textiles cuando las plantas se encuentran en la etapa de crecimiento (estas permiten una protección contra el viento) y humedecer estas en caso de ser necesario para que las plantas crezcan más rápido.
- Irrigar acorde con el tipo de planta.
- Mantener e inspeccionar los sistemas de riego.
- Fertilizar acorde el tipo de planta.
- Detectar y extraer malas hierbas en el caso de que aparezcan.
- Identificar, extraer y controlar plagas .
- Inspeccionar estado de plantas y replantar en caso de que no hayan sobrevivido.
- Mantener corte y poda de las plantas para mantener la estructura de la envolvente verde.
- Cambiar soporte estructural de la muralla verde en caso de ser necesario.
- Inspeccionar aislamiento y membrana de la cubierta y cambio de estas en caso de ser necesario.

Además, esta misma literatura describe que pueden existir otros tipos de mantención relacionados con factores independientes de las envolventes sustentables como:

- Inspeccionar y mantener sistema de ventilación y extracción del techo o las murallas en caso de que las envolventes estén cerca de éstas.
- Limpiar ventanas en caso de ser obstruidas por las murallas verdes.

Si bien este conjunto de tareas es bastante completo, falta una estructuración que facilite su análisis, como también falta información sobre los esfuerzos y costos asociados a estas actividades. Este tipo de estructuración e información apoyará mejores decisiones de diseño y construcción que disminuyen los costos y esfuerzos asociados a la mantención de envolventes verdes.

#### **2.4 Metodología de investigación**

La investigación se estructuró en tres etapas principales: identificar los procesos de mantenimiento de envolventes verdes, definir indicadores de desempeño, y evaluar estos procesos usando los indicadores definidos.

La primera etapa se basó en la revisión de literatura y entrevistas a 5 subcontratistas expertos en diseño y mantención de envolventes verdes para identificar y formalizar los procesos necesarios para mantener dichas envolventes en su óptimo funcionamiento. Cabe destacar el alto nivel de representatividad de las entrevistas ya que acorde a un catastro realizado por la Pontificia Universidad Católica de Chile en diciembre del año 2012 junto con el apoyo de InnovaChile de CORFO, existen 25 empresas que se dedican a la implementación y mantención de envolventes verdes. Las 5 empresas entrevistadas corresponden a las de mayor presencia nacional en términos de superficie. Paralelamente, se entrevistó a 4 mandantes que poseen techos y muros verdes.

La segunda etapa propuso un conjunto de indicadores de desempeño (KPI) para evaluar los procesos de mantenimiento de las envolventes verdes. Un panel de

expertos compuesto por 4 subcontratistas, académicos y profesionales que trabajan en el área de envolventes verdes propuso modificaciones y validó el conjunto de KPI. El panel fue moderado por los investigadores y reunió presencialmente a 3 de los expertos quienes contaron con el input previo del cuarto experto.

La tercera etapa consistió en la aplicación de los KPI a 12 casos de estudio donde se evaluaron los costos, productividad y periodicidad de los procesos de mantenimiento de las envolventes verdes, lo cual también sirvió para validar la factibilidad de aplicación de los KPI. Estos casos de estudio corresponden aproximadamente a 26.583 m<sup>2</sup> que es cerca del 44% del total de superficie de proyectos de envolventes verdes realizados por las empresas de mayor envergadura en Chile, los cuales conforman aproximadamente 60.000 m<sup>2</sup>. Cabe destacar que los resultados de los indicadores aplicados a los casos de estudio solo son representativos para la estación primaveral. Por último, 6 mandantes completaron los indicadores respecto al desempeño e impacto de la mantención de envolventes verdes para así poder evaluar cuál es su opinión respecto a dichos procesos realizados por las empresas externas.

## **2.5 Formalizando procesos de mantenimiento – Entrevistas a expertos**

Las preguntas realizadas en las entrevistas fueron abiertas y principalmente se enfocaban en identificar las actividades de mantenimiento relacionadas a envolventes verdes, quién realizaba dichas actividades, la información necesaria para poder realizar éstas, y finalmente, la interacción entre las actividades de mantención con el uso diario del edificio.

Los procesos de mantenimiento de envolventes verdes no difieren de los procesos obtenidos de la revisión de literatura. Además, las entrevistas mostraron que todos los procesos de mantenimiento son realizados por empresas especialistas y no por el administrador o dueño del edificio. Estas empresas rara vez ocupan información, herramientas computacionales o análisis previo a la visita a terreno para realizar la mantención. Con respecto al impacto del mantenimiento en el funcionamiento diario de la edificación, los dueños de la infraestructura coincidieron en que generalmente éste no se ve afectado y, en caso de que el acceso a la envolvente verde no esté bien diseñado y la mantención pudiera interrumpir el uso diario de la edificación, el mantenimiento se realiza fuera del horario laboral.

En cuanto a la evaluación de la mantención de la envolvente, el mandante mide el desempeño subjetivamente al revisar que la envolvente esté bien cuidada y que las plantas conserven una vegetación frondosa y agradable a la vista, pero no hace mediciones cuantitativas del desempeño. Siguiendo la misma línea, las empresas encargadas del mantenimiento no tienen rutinas predefinidas de evaluación *in situ*, sino que llegan a terreno, evalúan la situación y las necesidades de la envolvente y luego prosiguen a realizar las mantenciones necesarias.

En conclusión, los procesos realizados para el mantenimiento de las envolventes verdes son hechos principalmente por empresas externas. Estos procedimientos están poco formalizados y además no existen indicadores de desempeño, mediciones o diagnósticos formales para poder hacer un adecuado seguimiento de

estos procesos. Más aún, a medida que los elementos de la envolvente empiezan a mostrar signos de estrés o falla, se toman medidas correctivas en vez de ir realizando constantemente medidas preventivas.

Finalmente, como resultado de las entrevistas se logró realizar una agrupación de los procesos realizados en la mantención de las envolventes verdes. Dichos procesos se pueden dividir en 3 grupos.

- Inspección: revisión del estado de las plantas y de los sistemas de soporte
- Mantenimiento rutinario: labores que deben realizarse con cierta periodicidad, como la poda, fertilización y riego.

Reparación: acciones no programadas que se realizan cuando se observa un problema que puede ser en los distintos elementos de la envolvente (soporte estructural, sistema de impermeabilización, sistema de riego, plantas, etc.). Algunos ejemplos de estos procesos son el desmalezado, la reposición de plantas, reparación de elementos de riego, reparaciones de elementos de estructuras de soporte, y reparaciones al edificio producto de daños provocados por filtraciones.

## **2.6 KPI para el mantenimiento de envolventes verdes - propuesta y aplicación**

Como resultado del panel de expertos se definieron 4 grupos de indicadores para evaluar el desempeño de las actividades de mantenimiento de envolventes verdes: costos unitarios, consumo de mano de obra, periodicidad, e impacto.

A continuación se explican los indicadores y las mediciones realizadas.

### Costos Unitarios

Se consideran los costos unitarios del último mes que corresponden a la mano de obra (MO), materiales (incluye plantas), equipos y herramientas. Si bien existen traslapes entre algunos de estos indicadores, se buscó controlar variables relevantes para las empresas de mantenimiento.

- Totales mensuales: Costos totales incurridos por la mantención de 1 m<sup>2</sup> de envolvente verde en 1 mes. Incluyen inspección, mantenimiento rutinario y reparaciones.
- Reparación: Costos incurridos por reparaciones comunes de 1 m<sup>2</sup> de envolvente verde en 1 mes. Incluyen la reparación o reposición de elementos de soporte, sistema de riego, sistema de impermeabilización, sistema de reutilización de agua (en caso de existir) y cualquier costo que sea catalogado de reparación.
- Reparaciones extraordinarias: Costos incurridos por reparaciones extraordinarias de 1 m<sup>2</sup> de envolvente verde en 1 mes. Incluyen la reparación o reposición de elementos extraordinarios como, por ejemplo, filtraciones de agua de riego hacia la estructura del edificio, deterioro de elementos del edificio (ventanas, sistemas de ventilación, etc.) a causa de las plantas, o cuando la envolvente en su totalidad se ve afectada, caída de una muralla, fallo de un módulo entero y hay que reemplazarlo o repararlo etc.
- Reposición plantas: Costos por m<sup>2</sup> incurridos por la reposición de plantas de envolvente verde en 1 mes.

- Rutinarios: Costos incurridos por la inspección, riego, fertilización, desmalezado, poda, control de plagas y cualquier otro costo incurrido por el control rutinario de la envolvente verde de 1 m<sup>2</sup> en 1 mes.

#### Consumo de Mano de Obra

Se consideran las HH (Horas-Hombre) por m<sup>2</sup> y por semana. Se mide el último mes y se divide por 4 para eliminar variaciones por proyectos con frecuencia de mantención superior a una semana. Las definiciones de estos indicadores son análogas a los respectivos indicadores de costo.

- Totales mensuales
- Reparación
- Reparaciones extraordinarias
- Reposición plantas
- Rutinarios

#### Periodicidad

- Tasa de reparación: Cantidad de reparaciones que se realizan al mes por cada m<sup>2</sup> de envolvente verde. Incluye la reparación o reposición de elementos de soporte, riego, impermeabilización, reutilización de agua (en caso de existir) y cualquier otra operación que sea catalogada como reparación. Se consideran las reparaciones del último mes para así calcular cada cuánto se realizan éstas.
- Cantidad de plantas repuestas: Cantidad de plantas repuestas en el último mes por m<sup>2</sup> de envolvente verde.

- Tasa de reposición de plantas: Cantidad de instancias de recambio de plantas del último mes por cada m<sup>2</sup> de envolvente verde.
- Tasa control rutinario: Cantidad de instancias al mes donde se realizan mantenciones rutinarias por cada m<sup>2</sup> de envolvente verde. Corresponden a la inspección, riego, fertilización, desmalezamiento, poda, control de plagas y cualquier otro proceso que involucre el mantenimiento rutinario de la envolvente verde.

### Impacto

Estos indicadores lo responden los mandantes de la infraestructura y se mide mensualmente.

- Satisfacción general del usuario: Cuan satisfecho se encuentra el usuario con la mantención de la envolvente verde. Se mide con una escala Likert de 4 estados: Muy satisfecho, satisfecho, insatisfecho y muy insatisfecho.
- Impacto en la imagen del usuario: Evalúa si la envolvente ha producido un impacto beneficioso en el negocio para el usuario. Escala Likert: Muy positivo, positivo, no hubo impacto/no lo nota, negativo.
- Percepción de interferencia de la mantención con el uso diario de la edificación: Evalúa cualitativamente en qué medida los trabajos de mantención interfieren con el uso diario (operación) de la edificación. Se mide con 4 estados de la escala Likert: Siempre, frecuentemente, pocas veces y nunca.
- Interferencia de la mantención con el uso diario de la edificación: Evalúa cuantitativamente la interferencia de los trabajos de mantención con el uso

diario (operación) de la edificación. Se mide en horas mensuales en que han tenido que interferir el normal uso o funcionamiento de la infraestructura.

- Impacto sociológico (mayor superficie de áreas verdes): Estudia si se ve afectada de algún modo la sociedad (como grupo) que está en contacto con la envolvente verde y el cambio que ha producido. En otras palabras, indica la percepción de un conjunto de usuarios que transita cerca de la envolvente con respecto a la infraestructura. Con 5 estados: Muy satisfecho, satisfecho, no lo he notado, insatisfecho y muy insatisfecho.
- Impacto psicológico: Indica la percepción de los individuos (como persona particular) con respecto al bienestar que sienten cuando se encuentran rodeados por la envolvente verde, si se ven afectadas dichos individuos en el ámbito de las sensaciones, emociones y percepciones. Con 5 estados: Muy satisfecho, satisfecho, no lo he notado, insatisfecho y muy insatisfecho.
- Consumo de agua: Mide si el mandante ha percibido un cambio en su consumo de agua desde que se instaló la envolvente verde o en comparación con infraestructura similar. Usa una escala Likert de 3 estados: Menor a lo esperado, Igual a lo esperado y Mayor a lo esperado.

Junto con los indicadores mencionados anteriormente, se levantaron variables que caracterizan a cada proyecto. Lo anterior se debe a que el panel de expertos concluyó que los resultados de los indicadores podrían tener distinto comportamiento en base a estas variables de contexto. Dichas variables son la ubicación del proyecto, qué tipo de plantas o vegetación posee, la superficie del proyecto, la calidad del diseño, la exposición (a transeúntes, vehículos,

contaminación, etc.) de la envolvente, el tipo de acceso que posee, qué tipo de envolvente es (específicamente que tipo de techo o muro de acuerdo a la Figura 2-1), si considera reutilización de agua, si es regada por bomba, si es fertirrigado, si se encuentra en el interior o en el exterior de la edificación, si la mantención se realiza en algún horario especial solicitado por el mandante, el tipo de sustrato que posee y el mes y año en que fueron aplicados los indicadores de desempeño a la envolvente. Estas variables fueron utilizadas para analizar si existe correlación alguna entre éstas y los distintos indicadores evaluados.

Los indicadores de desempeño fueron aplicados a 12 proyectos de envolventes verdes (5 muros y 7 techos) de distintos tamaños y características. Además, 6 mandantes completaron los indicadores que evalúan el desempeño o impacto de la mantención realizada por empresas externas. Cabe destacar que los indicadores fueron aplicados sólo en la estación de primavera dado que las empresas no tenían información histórica que pudiera usarse para evaluar los indicadores en todas las estaciones del año. La tabla 1 presenta las estadísticas descriptivas para todos los proyectos.

Tabla 2-1: Estadísticas de desempeño envolventes verdes

<b>Estadísticas KPI Envolventes Verdes</b>						
<b>KPI</b>	<b>Unidad</b>	<b>Indicador</b>	<b>Media</b>		<b>Desviación estándar</b>	
			<b>Muros</b>	<b>Techos</b>	<b>Muros</b>	<b>Techos</b>
<b>Costos unitarios</b>	[CLP/m2/mes]	<b>Totales Mensuales</b>	2,642	390	367	409
	[CLP /m2/mes]	<b>Reparación</b>	426	828	613	2,061
	[CLP /m2/mes]	<b>Reparación Extraordinaria</b>	61	652	58	1,697
	[CLP /m2/mes]	<b>Reposición Plantas</b>	364	219	292	457
	[CLP /m2/mes]	<b>Rutinario</b>	1,493	348	331	428
<b>Consumo Mano de Obra</b>	[HH/m2/mes]	<b>Totales Mensuales</b>	0.130	0.029	0.051	0.0288
	[HH/m2/mes]	<b>Reparación</b>	0.009	0.013	0.013	0.0123
	[HH/m2/mes]	<b>Reparación Extraordinaria</b>	0.004	0.006	0.004	0.0138
	[HH/m2/mes]	<b>Reposición Plantas</b>	0.021	0.006	0.023	0.0061
	[HH/m2/mes]	<b>Rutinario</b>	0.106	0.029	0.053	0.0288
<b>Periodicidad</b>	[cantidad de reparaciones/m2/mes]	<b>Tasa de Reparación</b>	0.020	0.002	0.036	0.0017
	[cantidad plantas repuestas/m2/mes]	<b>Cantidad de Plantas Repuestas</b>	0.098	0.839	0.113	1.3044
	[cantidad veces que se reponen plantas/m2/mes]	<b>Tasa Reposición Plantas</b>	0.004	0.002	0.003	0.002
	[cantidad mantenciones rutinarias/m2/mes]	<b>Tasa Control Rutinario</b>	0.041	0.019	0.036	0.0381

Los resultados muestran que los valores promedio de los costos y consumos de mano de obra totales, rutinarios y de reposición de plantas para proyectos de techos verdes en un mes son significativamente menores a los de proyectos de muros verdes. Lo contrario ocurre para reparaciones y reparaciones extraordinarias. Esto se puede deber a que es más barato y consume menos recursos humanos trabajar en los techos que en los muros dado que el acceso y el trabajo es más fácil en superficies horizontales. Se tiene que enfatizar que los datos cuantitativos de las envolventes verdes fueron entregados por metro cuadrado, y por lo tanto, los costos totales no coinciden y son menores que la suma de los otros

costos. Por otro lado, las reparaciones – especialmente las extraordinarias – están asociadas a filtraciones y los problemas que ellas acarrearán. Una posible explicación de lo anterior es que en el caso de los techos verdes ocurren problemas con el riego ya que el agua escurre a las losas del techo y por ende se tienen daños mayores que en los casos de los muros. Por otra línea, la cantidad de reparaciones, la cantidad de veces que se reponen plantas y la cantidad de mantenciones rutinarias en un metro cuadrado en un mes son mayores en los muros verdes que en los techos verdes. Esto se puede explicar porque en las murallas verdes se tiene una superficie vertical y por ende, es más difícil que el riego llegue homogéneamente a todas las plantas y además, si la muralla verde no está bien diseñada puede ser más engorroso realizar la mantención a toda la superficie por igual. En cambio, los techos verdes son superficies horizontales, por lo que el riego es más homogéneo y controlable y además la persona que realiza la mantención puede acceder a toda la superficie de la envolvente por igual y tener menores inconvenientes para desplazarse por ella. Opuestamente, el promedio de la cantidad de plantas repuestas por metro cuadrado en un mes es mayor en techos verdes que en muros verdes.

Se realizó un análisis de correlación con el *software* estadístico XLStat y se concluyó que no existe correlación para un mismo indicador – estos son: totales mensuales, reparación, reparación extraordinaria, reposición de plantas, y rutinario – en las distintas unidades de costos unitarios y productividad aún cuando esto era de esperarse para los dos tipos de envolvente. Lo anterior significa que hay que hacer un seguimiento por un tiempo más prolongado (en vez de solo en una

estación) y a un porcentaje mayor de envolventes para así poder obtener un análisis más profundo y representativo sobre los indicadores. Para los techos verdes, se encontró una correlación de 97,7% para los costos y productividad en reparaciones extraordinarias y una correlación de 96,6% para los costos totales mensuales incurridos para la mantención y los costos rutinarios de mantención. Lo anterior era de esperarse ya que cuando no se presentan reparaciones extraordinarias en la envolvente, los costos totales incurridos para la mantención debieran ser los respectivos al control rutinario y cuando sí se presentan dichas reparaciones, los costos debieran ser proporcionales a las horas hombres que se ocupan en reparar el daño o falla.

Con respecto a la caracterización de los proyectos de muros verdes (los cuales fueron clasificados como modulares y continuos) y a los indicadores, se puede concluir que todos los muros que participaron en la recopilación de información son fertirrigados, hidropónicos, ocupan reutilización de agua para el riego, el riego es a través de una bomba y en su mayoría se accede a ellos directamente o por grúa. Además, el mayor costo de reparación (\$1.500 CLP) fue una muralla expuesta a transeúntes y que se encuentra en una vereda, por lo que se podría explicar a través de esta exposición constante a personas el alto costo de reparación mensual promedio que se incurre por metro cuadrado. En la misma línea, las tres murallas que tuvieron la mayor cantidad de plantas repuestas por metro cuadrado se encuentran expuestas a un gran tránsito vehicular, lo cual puede explicar el por qué es necesario recambiar las plantas más a menudo que en el resto de las murallas verdes. Por otro lado, no se encontró correlación alguna entre

los metros cuadrados totales de la envolvente y los indicadores, lo que está ligado a las limitaciones de tiempo y cantidad de envoltentes de los indicadores aplicados.

Al analizar la clasificación de los techos verdes se puede concluir que todos son extensivos, no son fertirrigados, no utilizan reutilización de agua y que en su mayoría ocupan riego por bomba. Por otro lado, los costos totales mensuales y los costos rutinarios para la mantención de un metro cuadrado de techo verde varían inversamente proporcional con los metros cuadrados totales que posee el techo verde. Es decir, mientras más grande el techo verde, menores son los costos totales mensuales y rutinarios que se incurren para la mantención. Lo anterior se puede explicar por economías de escala. Asimismo, el techo que tuvo la mayor cantidad de plantas repuestas por metro cuadrado en un mes se encuentra dentro de un colegio donde los alumnos están en contacto directo con el techo y, por ende, la envolvente se encuentra más expuesta.

Finalmente, para los techos y muros verdes se presentaron errores al clasificar la calidad del diseño y la exposición de la envolvente. En la calidad del diseño se esperaba que explicaran qué tan bien diseñada estaba la envolvente con respecto a la edificación, con respecto a su entorno, el acceso, entre otros, pero en vez de ello hubieron respuestas simples y poco explicativas (por ejemplo, dos de las respuestas fueron “buena”) o respuestas que no respondían la pregunta directamente sino más bien respondían qué tan complicado era realizar la mantención. Lo anterior se puede explicar porque los diseños de las envoltentes evaluadas fueron realizados por los expertos de mantención por lo cual existe la

probabilidad de sesgo sobre la calidad del diseño o porque la pregunta no fue adecuadamente explicada a los encuestados. Para la exposición de la envolvente, los subcontratistas indicaron la orientación de la envolvente en vez de explicar si la envolvente estaba expuesta a transeúntes, tránsito vehicular, maquinaria pesada, etc. por lo que en ambas clasificaciones se recibieron datos distintos a los esperados, lo cual pudo haber afectado el análisis de los datos. Por último, los encargados de la mantención de las envolventes no tienen datos o seguimientos sobre los procesos de mantención, por lo que los valores entregados no son exactos y son más bien estimaciones históricas obtenidas de la experiencia de dichos encargados. Lo anterior explica por qué los costos unitarios y la productividad total mensual no corresponden a la suma de los otros costos unitarios y de las productividades.

Las Figuras 2-2 a 2-7 continuación presentan los resultados de cada indicador de impacto para ambos tipos de envolvente (techos y muros) para así obtener conclusiones generales de la mantención de estas y no diferenciada por tipo de envolvente.

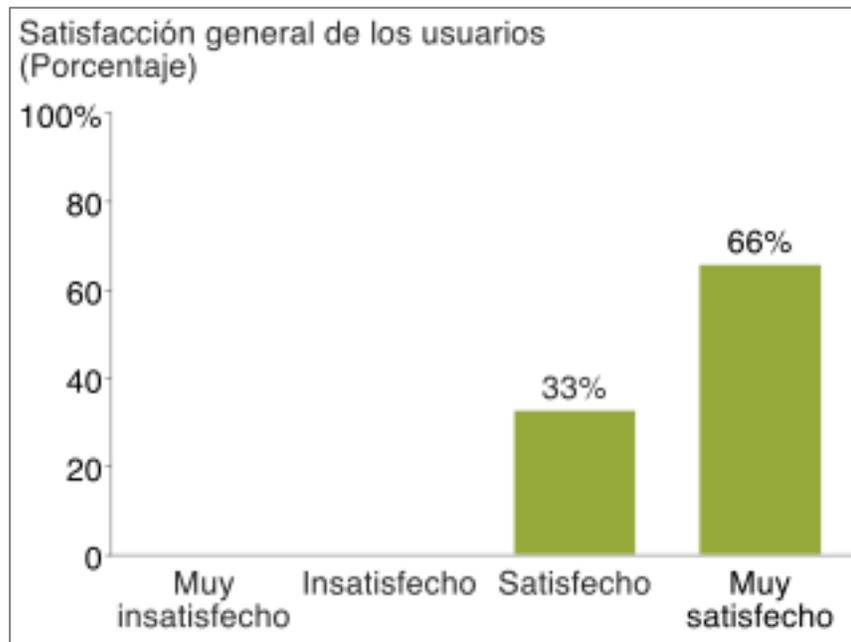


Figura 2-2: Satisfacción general de los usuarios con el mantenimientos de las envoltentes verdes.

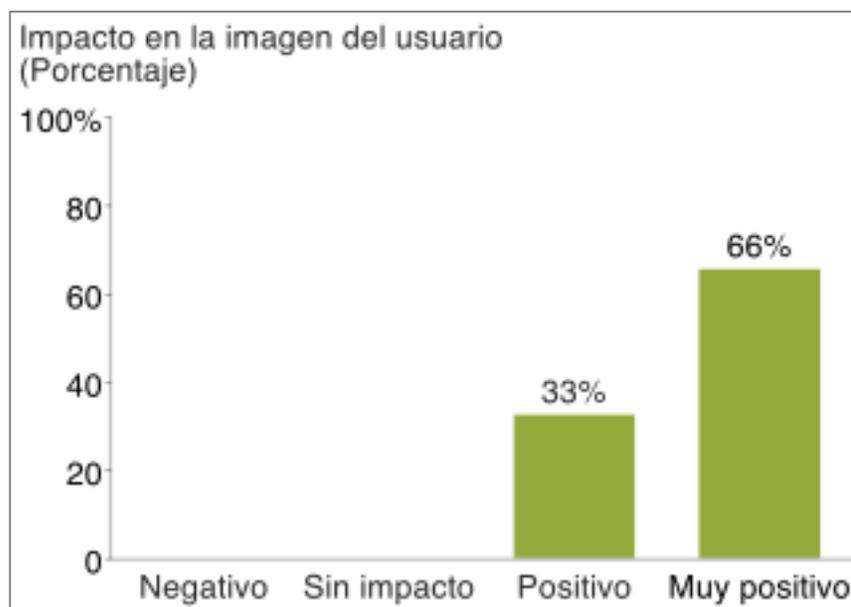


Figura 2-3: Impacto en la imagen del usuario debido a las envoltentes verdes.

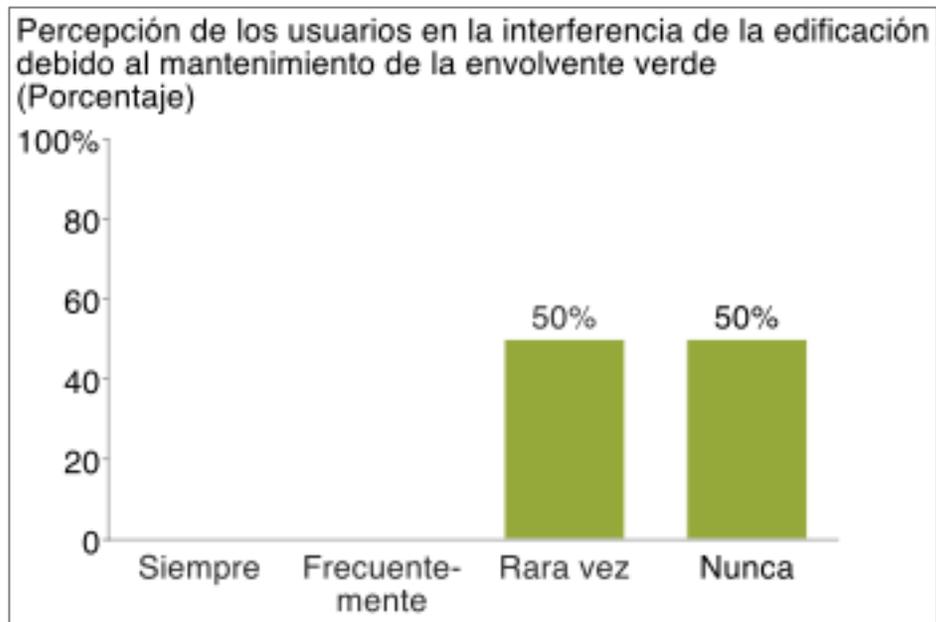


Figura 2-4: Percepción de los usuarios en la interferencia de la edificación debido al mantenimiento de la envolvente verde.

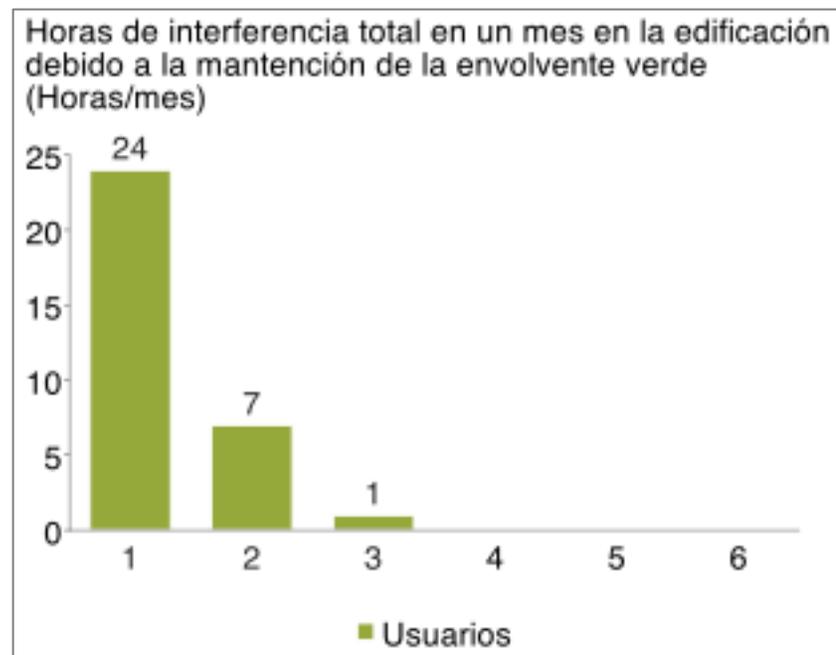


Figura 2-5: Horas de interferencia total en un mes en la edificación debido a la mantención de la envolvente verde.

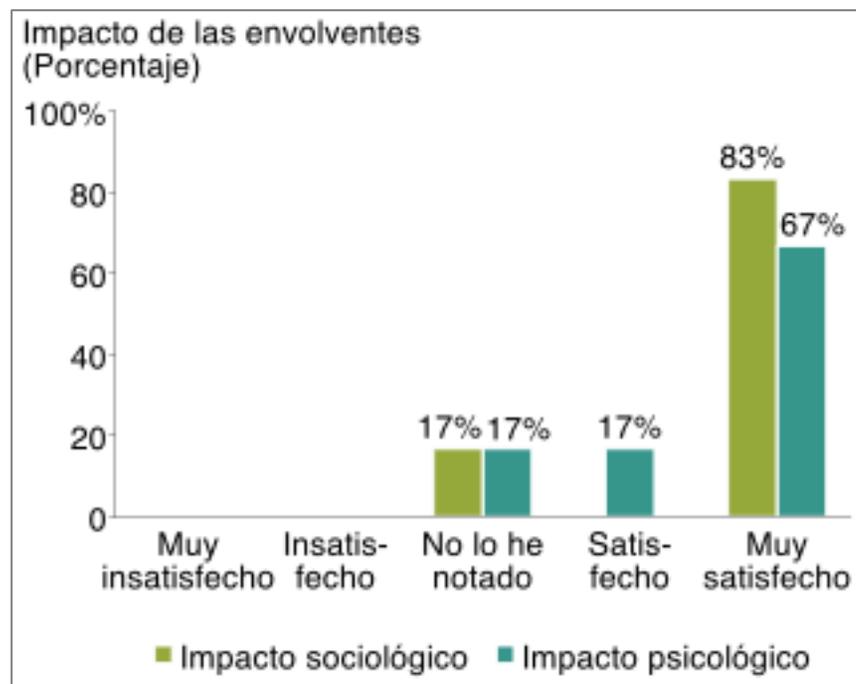


Figura 2-6: Impactos psicológico y sociológico en los usuarios debido a la envolvente verde.

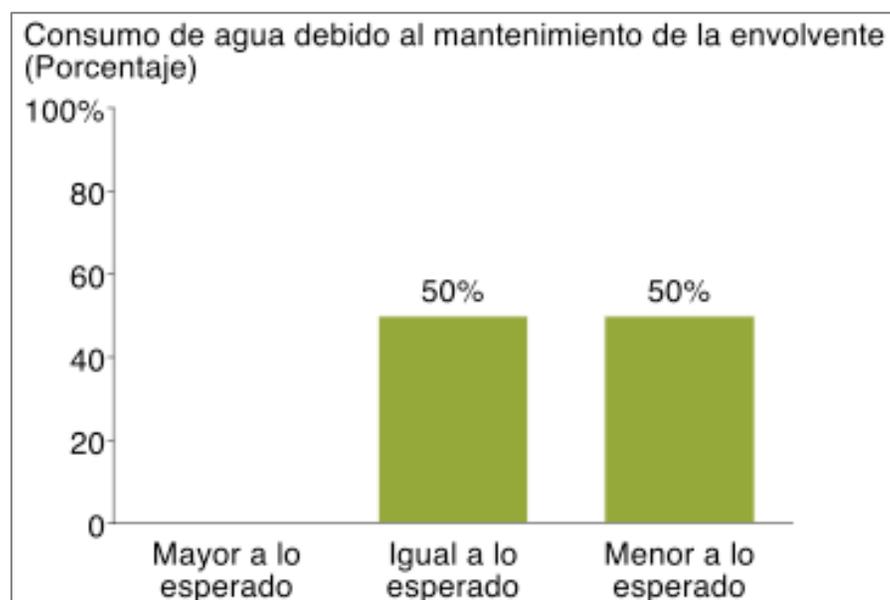


Figura 2-7: Percepción del consumo de agua de los usuarios debido al mantenimiento de la envolvente verde.

De los 6 gráficos anteriores se puede concluir que la mayoría de los usuarios se sienten satisfechos o muy satisfechos con la mantención general de la envolvente verde realizada por la empresa externa. Además, las envolventes han influenciado positiva o muy positivamente en la imagen del usuario. Por otro lado, todas las mantenciones realizadas a las envolventes verdes son en horarios especiales y éstas interfieren raramente o nunca en el uso diario de la edificación variando desde 0 a 24 horas de interferencia al mes. Este último dato cuantitativo se debe a que la envolvente está situada en un restaurante y existen muros verdes tanto dentro como fuera de la edificación. Con respecto al impacto sociológico, la mayoría de los usuarios están muy satisfechos con el cambio que ha realizado la envolvente verde en la sociedad que interactúa con ella y sólo un usuario no encontró cambio alguno. En la misma línea, cuatro usuarios están muy satisfechos con el impacto psicológico que ha provisto la envolvente verde en las personas, uno está satisfecho y sólo un usuario no lo ha notado. Por último, el 100% de los usuarios encuentran que el consumo de agua utilizado para la mantención de la envolvente verde es igual o menor a lo esperado.

Por otro lado, las entrevistas realizadas inicialmente en esta investigación mostraron que los mandantes no están mayormente involucrados en la mantención de las envolventes verdes. Lo anterior repercute directamente en la confiabilidad de los resultados de los indicadores de desempeño medidos con los usuarios. Por la misma razón, no se incluyeron otros indicadores de impacto más complejos (como por ejemplo el impacto en el consumo energético de la edificación debido a la envolvente verde).

## 2.7 Conclusiones

Los resultados del presente estudio mostraron que no existen procedimientos formales, pautas ni indicadores para evaluar procesos de mantenimiento de envolventes verdes. Por otro lado, se confirmó que los dueños de infraestructura con envolventes verdes no realizan la mantención sino más bien contratan a una empresa externa para este propósito. Además, la decisión de incluir envolventes verdes en el diseño de la infraestructura se debe principalmente a motivos de imagen (*marketing*) y no por sus múltiples beneficios tanto ambientales como sociológicos y de costos. Los resultados de las entrevistas a expertos fueron consistentes con la literatura respecto a cuáles son los procesos necesarios para mantener dichas envolventes. Estos procesos fueron estructurados en 3 grupos: inspección, mantenimiento rutinario y reparación, los cuales se aplican sobre los elementos vegetales, sistema de riesgo, y sistema de soporte. Dicho agrupamiento puede ser utilizado en futuras investigaciones para organizar la información necesaria para gestionar los procesos de mantenimiento.

Al analizar los KPI aplicados a los casos de estudio se puede concluir que los muros verdes tienen mayores costos y consumo de mano de obra promedio mensuales utilizados para la mantención, control rutinario y reposición de plantas en comparación con los techos verdes. Por el contrario, los costos y consumo de mano de obra promedio mensuales utilizados en reparaciones y reparaciones extraordinarias son mayores en los techos verdes. Además, las periodicidades de las mantenciones realizadas mensualmente son en su mayoría mayores en los

muros verdes, a excepción de la cantidad de plantas promedio repuestas. Opuesto a lo esperado, se encontraron pocas correlaciones entre los mismos indicadores en las distintas unidades de costos y consumo de mano de obra.

Las variables de contexto de los indicadores entregaron interesantes conclusiones respecto a la caracterización de los proyectos típicos (al menos en Chile). Se puede concluir que en general las envolventes verdes cuentan con un buen acceso (sea directo o por grúa) y en su mayoría tienen riego por bomba. Con respecto a las murallas verdes que fueron evaluadas, éstas utilizan fertirrigación, son hidropónicas y reutilizan el agua para el riego. En contraste, los techos verdes evaluados son extensivos y en su mayoría no son fertirrigados y no reutilizan el agua. Respecto a los indicadores completados por los mandantes de las envolventes verdes, se observa un alto nivel de satisfacción con la mantención realizada por las empresas externas. En la misma línea, estos indicadores presentan baja variabilidad lo cual se puede deber al bajo involucramiento de estos gestores de infraestructura en el mantenimiento de envolventes verdes. De hecho, los mandantes no realizan un seguimiento detallado de la mantención por lo que no son capaces de evaluar las distintas ventajas o cambios que conlleva un techo o muro verde.

El seguimiento sistemático a los procesos de mantenimiento de envolventes verdes a través de la aplicación de los KPI genera un potencial para apoyar la toma de decisiones, identificando uso inapropiado de recursos, tasas anormales de fallas, eficacia de soluciones vegetales o de los sistemas de riego, entre otros.

Las principales limitaciones del estudio fueron la limitación temporal que definimos a la aplicación de los KPI (se aplicó durante una temporada de primavera) y la falta de información estructurada por parte de los contratistas de mantenimiento. La primera afectó principalmente la capacidad de generalizar los resultados obtenidos. Claramente se necesitan más datos para poder entender el flujo completo a través de las distintas estaciones, sin embargo, esta aplicación parcial mostró el potencial que estas mediciones tienen y el tipo de análisis que se pueden hacer. La segunda limitación afectó la eficiencia en la medición y potencialmente la calidad de los datos y por lo tanto la interpretación directa de los KPI. Ambas limitaciones deben ser consideradas en futuras investigaciones.

### **3. EVALUACIÓN DEL POTENCIAL DE USO DE BUILDING INFORMATION MODELING (BIM) PARA APOYAR LA MANTENCIÓN DE ENVOLVENTES VERDES**

La metodología BIM (Building Information Modeling) presenta una oportunidad para mejorar procesos en la fase de mantención de una infraestructura. Existe literatura que ha mostrado beneficios de usar BIM para esta fase. Sin embargo, no se ha investigado el uso de BIM para apoyar mantenimiento de infraestructura con sistemas vivos. Es más, se desconoce el impacto que podría tener el hecho que algunos de estos procesos sean realizados por organismos externos a la organización dueña de la infraestructura. Un ejemplo de estos últimos es el mantenimiento de envolventes verdes donde los sistemas de plantas y sustratos son muy relevantes y las operaciones de mantenimiento son típicamente subcontratadas.

Este paper utiliza entrevistas a expertos para identificar los principales requerimientos de información para la mantención de envolventes verdes. Luego, analiza la capacidad de IFC (Industry Foundation Classes) para representar esos elementos de información, y propone un MVD (Model View Definition) que satisfaga los requerimientos para los procesos básicos de mantención de envolventes verdes.

Los resultados mostraron que IFC posee los elementos apropiados para representar la mayoría de los requerimientos de información necesarios para apoyar la mantención de las envolventes verdes. Los únicos elementos faltantes están relacionados con las entidades de sistema vegetal, acceso a envolventes y soporte estructural. Por otro lado, no encontramos relación entre la capacidad de IFC para representar los requerimientos

de información y el hecho que los procesos de mantenimiento sean realizados por terceros. Sin embargo, esta externalización sí debiera ser influyente en la implementación de este uso BIM.

Palabras clave: BIM, IFC, Envolventes Verdes, Mantenición

### **3.1 Introducción**

Los costos de operación y mantención de una edificación pueden ascender a muchas veces más que su costo inicial de construcción (Becerik-Gerber et al., 2012). Por esta razón, Arayici, Onyenobi y Egbu (2012) destacan la necesidad de optimizar la gestión de instalaciones para lograr un ciclo de vida del edificio eficaz y eficiente.

En la misma línea, varios estudios han discutido los beneficios de utilizar la metodología BIM (Building Information Modelling) para la gestión de instalaciones (Becerik-Gerber et al., 2012; Dong et al., 2014; Eastman et al., 2011; Motawa & Almarshad, 2013; Schley et al., 2013). Los modelos BIM son una plataforma de conocimiento compartido para crear y guardar información que mejora la toma de decisiones durante todo el ciclo de vida de las edificaciones (Nicał & Wodyński, 2016). Por esta razón, es particularmente atractivo su uso para apoyar la fase donde están los mayores costos del ciclo de vida.

Sin embargo, la literatura no ha investigado el uso de BIM para apoyar el

mantenimiento de infraestructura con sistemas vivos, como es el caso de las envolventes verdes. Otro desafío interesante en este tipo de infraestructura es que los procesos de mantenimiento son realizados por organismos externos a la organización dueña del edificio. Es importante poner atención a este tipo de infraestructura ya que estos componentes han sido crecientemente incorporadas en las áreas urbanas en los últimos 100 años (Li & Yeung, 2014) debido a sus numerosos beneficios ambientales, ecológicos, sociológicos y económicos (Getter & Rowe, 2006).

Por lo tanto, para poder utilizar BIM como apoyo a los procesos de mantenimiento de envolventes verdes, es necesario identificar la información requerida para la mantención de las envolventes verdes y evaluar si el modelo de base de datos que utiliza BIM – IFC (Industry Foundation Classes) – es consistente con esos requerimientos de información.

Las siguientes secciones discuten la literatura relacionada al uso de BIM para la gestión de instalaciones y al modelo de datos IFC.

### **3.2 BIM para la gestión de instalaciones**

Varios autores han discutido los beneficios de BIM para apoyar la gestión de instalaciones. Becerik et al (2012) realizaron una encuesta que muestra que las organizaciones encargadas de la gestión de instalaciones ya han empezado a utilizar metodologías BIM para la operación y gestión de datos (32% de los

organismos encuestados utilizaban actualmente BIM) o piensan implementarlo en sus procesos en un futuro inmediato (60% de los encuestados). En la misma línea, proponen que BIM puede facilitar y beneficiar estudios de mantenimiento que están enfocados en el desempeño deseado en varias etapas del ciclo de vida de la edificación para áreas de mantenimiento, específicamente: accesibilidad, sustentabilidad de los materiales y mantenimientos preventivo (Becerik-Gerber et al., 2012).

Por otro lado, hay estudios que han explorado usos específicos de BIM en las fases de operación y mantención que confirman la importancia de extender BIM a la práctica de gestión de instalaciones (G. Carbonari, Stravoravdis, & Gausden, 2015). Por ejemplo, Carbonari, Stravoravdis y Gausden (2015) estudiaron la disponibilidad de la información por medio de BIM, Hajian y Becerik-Gerber (2010) investigaron el desarrollo de programas de mantenimiento y la oportunidad de realizar un seguimiento de la información del ciclo de vida de la infraestructura, Arayici, Onyenobi, y Egbu (2012) se enfocaron en la creación y reutilización digital por parte de los interesados del proyecto, planificación y factibilidad para renovaciones y además en el control de energía, Carbonari y Jones (2014) estudiaron la información en tiempo real sobre el desempeño del edificio, cómo se puede optimizar el uso de la edificación y modelaron el comportamiento de los ocupantes. Costin (2012) investigó sobre la localización móvil de recursos de la edificación, Fillingham, Gulliver y Nikolik (2015) se centraron en la administración del espacio y por último, Codinhoto y Kiviniemi (2014) analizaron

la gestión de seguridad y emergencia a través de la metodología BIM.

Como mencionamos previamente, todos estos estudios se enfocan en los beneficios desde el punto de vista de los dueños de la infraestructura, dejando fuera a actores externos, como es el caso de las mantenciones de envolventes verdes. También, ninguno de estos estudios incluye infraestructura con componentes vivos.

### **3.3 Modelos de datos en BIM**

Un aspecto fundamental de la metodología BIM es la información contenida en el o los modelos. Por esta razón, el modelo de datos usado para facilitar los flujos de información entre aplicaciones y actores del proyecto se ha convertido en un elemento muy importante de la metodología. El modelo de datos que utiliza BIM es IFC (Industry Foundation Classes), el cual es un estándar que especifica representaciones de objetos para la industria AIC - Arquitectura, ingeniería y construcción - (Vanlande, Nicolle, & Cruz, 2008) y que además provee un formato de datos neutral que es un estándar ISO global que permite la interoperabilidad entre distintos sistemas (Lee, Smith, & Kang, 2011). El esquema IFC contiene alrededor de 900 clases en las que la mayoría son representaciones geométricas, relaciones o topologías (Laat & Berlo, 2011), agrupadas en tres tipos de clases: clases de objetos, clases de relaciones y clases de recursos (Vanlande et al., 2008). Existen varios casos de estudio que entregan evidencia de los beneficios de IFC en ámbitos tan variados como la digitalización y estructuración de carreteras hasta la

estimación de costos de edificaciones (Bos, 2012; El-Mekawy, Östman, & Hijazi, 2012; Fu, Aouad, Lee, Mashall-Ponting, & Wu, 2006; S. H. Lee & Kim, 2011; Lin et al., 2013; Pazlar & Turk, 2008; Weise, Liebich, Tulke, & Bonsma, 2009; Zhiliang, Zhenhua, Wu, & Zhe, 2011). Sin embargo, IFC continua en desarrollo ya que su complejidad y la falta de recursos no le han permitido desarrollarse rápidamente (Boddy, Rezgui, Cooper, & Wetherill, 2007) y por ende, va a tomar algo de tiempo que este enfoque sea ampliamente adoptado (Shen et al., 2012). En esta línea, diversas investigaciones están constantemente evaluando la factibilidad de uso de IFC en diversas áreas de proyecto. Por ejemplo, Zhang et al (2014) estudiaron el desarrollo e implementación de un modelo de información gráfica basada en IFC para la construcción virtual, Qin, Deng y Liu (2011) investigaron sobre IFC en la integración del diseño arquitectónico y al análisis estructural y Gao et al (2015) analizaron un método de expansión de interrogantes para recuperar recursos BIM en línea basado en IFC.

Relacionado a la aplicabilidad de IFC en diversas áreas de proyecto, existe el concepto de los Model View Definitions (MVD). Estos definen un subconjunto del esquema IFC el cual es requerido para satisfacer uno o varios requerimientos de intercambio de información para un uso particular de la industria AIC. Es decir, los MVD indican específicamente qué datos son necesarios para ciertos procesos (BuildingSMART, 2016). Un MVD utilizado para la gestión de instalaciones es COBie (Construction - Operations Building Information Exchange), el cual entrega información sobre los activos de las instalaciones, reduciendo la cantidad de documentos necesarios para este intercambio de información (East &

Carrasquillo-Mangual, 2012). COBie está orientado a mantener, operar y hacer seguimiento a activos relacionados con sistemas de climatización, plomería, extinción de incendios, electricidad, control, ascensor, comida, arquitectura, mobiliario y a nivel de urbanización (aguas, drenaje sanitario, alcantarillado, combustible y fuego) (East & Carrasquillo-Mangual, 2012). Sin embargo, la infraestructura asociada a envolventes verdes presenta varios desafíos no cubiertos por COBie al incluir elementos no tradicionales como las plantas y aspectos logísticos complejos de acceso.

### **3.4 Procesos de mantenimiento de envolventes verdes**

Luckett (2009) identificó, y Ruckert y Mourgues (2017) validaron con expertos, los siguientes procesos de mantenimiento de envolventes verdes:

- Mantener acceso a la envolvente verde
- Cubrir las plantas con geo textiles cuando estén en la etapa de crecimiento (estos proporcionan protección contra el viento) y humedecer geo textiles si es necesario para permitir que las plantas crezcan más rápido
- Irrigar según el tipo de planta
- Mantener e inspeccionar los sistemas de riego
- Fertilizar según el tipo de planta
- Detectar y eliminar malezas cuando aparecen
- Identificar, eliminar y controlar las plagas
- Inspeccionar el estado de las plantas y replantar las que no sobreviven

- Mantener el corte y la poda de las plantas para mantener la estructura de la envolvente verde
- Cambiar el soporte estructural de la muralla verde en caso de ser necesario
- Inspeccionar el sistema de aislamiento y la membrana de la cubierta y cambiarla de ser necesario

Además, Ruckert y Mourgues (2017) identificaron y clasificaron los principales procesos de mantenimiento de las envolventes verdes en tres grupos: inspección (revisión del estado de las plantas y de los sistemas de soporte), mantenimiento programado (tareas que deben realizarse con cierta periodicidad tales como la poda, irrigación y riego) y reparación (acciones no programadas que se realizan cuando se observa un problema en un elemento de la envolvente - soporte estructural, sistema de impermeabilización, sistema de riego, plantas, etc. Algunos ejemplos de estos procesos son sacar la maleza, replantar, reparar elementos de riego, reparar elementos de las estructuras de soporte y realizar reparaciones en el edificio causados por fugas).

Esta investigación usará esta clasificación como base para identificar los requerimientos de información para los procesos de mantenimiento de envolventes verdes.

### **3.5 Metodología de investigación**

Esta investigación continúa un trabajo previo donde se identificaron y caracterizaron los procesos de mantenimiento de envolventes verdes (discutidos en la sección anterior). Estos procesos se usaron como base para entrevistas a expertos con las que se formalizó la información necesaria para ejecutar esos procedimientos. Posteriormente, se evaluó si el modelo IFC contiene estos requerimientos de información. Esta evaluación usa un análisis similar al planteado por Wan, Chen, and Tiong (2004). En base a esta evaluación, se propuso un MVD que contiene los requerimientos de información para la mantención de envolventes verdes, identificando las entidades y propiedades que son parte de IFC y otras adicionales.

### **3.6 Formalización requerimientos de información para la mantención de envolventes verdes**

Por medio de la identificación y clasificación realizada por Ruckert y Mourgues (2017) y entrevistas a tres expertos del área de mantención de envolventes verdes se procedió a formalizar los requerimientos de información necesarios para la mantención de dichas soluciones sustentables. Las entrevistas fueron realizadas por medio de preguntas abiertas a los expertos en dónde se les pedía especificar cuáles eran los requerimientos de información necesarios para cada actividad de mantenimiento realizada en cada sistema o elemento específico. Las actividades pueden ser descritas como los procesos necesarios para llevar a cabo un

mantenimiento adecuado y los sistemas o elementos son todos aquellos componentes a los cuales se les realiza la mantención. Al tener definidos los requerimientos se procedió a reorganizarlos en la siguiente tabla en donde para cada sistema y actividad se define la información específica necesaria.

Tabla 3-1: Requerimientos de información propuestos para la mantención de envoltentes verdes.

ACTIVIDADES		SISTEMAS O ELEMENTOS				
		Soporte estructural	Sistema riego	Acceso envoltente	Sistema impermeabilización	Sistema vegetal
Planificar procesos de mantención y control de gestión		Tipo Subtipo Materiales Orientación	Origen del agua Tipo de sistema Canales recuperación agua Presión óptima Materiales Áreas que alimenta	Disponibilidad Ubicación Sistemas de seguridad	Materiales	Tipo especie vegetal Tipo sustrato Exposición Tamaño Época del año
Ejecutar activid. sobre otros sistemas	Inspección	Materiales	Origen del agua Canales recuperación agua Presión óptima Materiales	Disponibilidad Ubicación	Materiales	-
	Mantenimiento programado	-	Presión óptima Materiales Áreas que alimenta	-	-	-
	Reparación	Subtipo Materiales	Canales recuperación agua Materiales	Disponibilidad Ubicación Sistemas de seguridad	Materiales	-
Ejecutar activid. sobre plantas	Control de plagas	-	-	-	-	Tipo especie vegetal Tipo sustrato
	Riego	-	-	-	-	Tipo especie vegetal Tipo sustrato Exposición
	Fertilización	-	-	-	-	Tipo especie vegetal Tipo sustrato Época del año
	Poda	-	-	-	-	Tamaño
	Desmalezado	-	-	-	-	Tipo especie vegetal
	Reemplazo de plantas	-	-	-	-	Tipo especie vegetal
	Fumigación	-	-	-	-	Tipo especie vegetal Tipo sustrato

La Tabla 3-1 detalla los requerimientos de información para los procesos de mantención de envolventes verdes. Las columnas representan los tipos de sistema o elementos constructivos y las filas, el tipo de actividad de mantenimiento que se realiza sobre dichos sistemas/elementos. De esa forma, los valores en las celdas corresponden a la información que se requiere para poder ejecutar esa actividad sobre ese sistema/elemento. A continuación, se explican los requerimientos de información acorde a cada sistema o elemento.

- i. Soporte estructural: elementos que sostienen los sustratos y plantas a través de los techos o muros.
  - a. Tipo: describe si el soporte es para techo o muro.
  - b. Subtipo: describe el subtipo de techo o muro verde en el cual se instala el soporte. Los valores pueden ser intensivo, semi-intensivo, o extensivo para techos, y fachada verde o sistema de muralla viva para muros.
  - c. Material: describe la materialidad del soporte.
  - d. Orientación (aplica sólo a muros): describe la dirección geográfica que está enfrentando el elemento estructural.
  
- ii. Sistema de riego: elementos que componen el sistema de irrigación del muro y/o techo verde.
  - a. Origen del agua: ubicación (coordenadas) de dónde será extraída el agua y si viene de tanque, pozo, río, lluvia, manantiales, cañerías del edificio etc.
  - b. Tipo de sistema: describe si el riego es por aspersión o goteo, si utiliza

recirculación de agua, entre otros.

c. Canales de recuperación de agua: elementos de los canales de recuperación del agua en caso de que corresponda.

d. Presión óptima: describe la presión óptima del sistema de riego dada las características de la envolvente verde.

e. Materiales: describe la materialidad del sistema de riego.

f. Áreas que alimenta: Elemento que indica dónde termina cada rama del sistema de riego y por ende indica las zonas o sectores que se deben regar.

iii. Acceso a envolvente: espacio físico dónde se puede ingresar a la envolvente o mantenerla directamente (ejemplo: escalera, zona delimitada para ubicar la grúa en el caso de ser una muralla, puerta de acceso, entre otros).

a. Disponibilidad: describe si existe restricción horaria para realizar la mantención a la envolvente verde.

b. Ubicación: coordenadas geográficas del acceso a la envolvente.

c. Sistemas de seguridad: si es necesario ocupar algún sistema de seguridad (arnés, casco, etc.) para realizar la mantención.

iv. Sistema de impermeabilización.

a. Materiales: describe la materialidad que compone el sistema de impermeabilización.

v. Sistema vegetal.

- a. Tipo de especie vegetal: clasificación y nombre de las plantas presentes en la envolvente verde.
- b. Tipo sustrato: base orgánica que utiliza el tipo de especie vegetal.
- c. Exposición: sistemas o elementos que pueden medir la exposición a: ruidos, contaminación, autos, personas y cualquier otra exposición que afecte el crecimiento del sistema vegetal .
- d. Tamaño: altura y ancho óptimo diseñado para las plantas (acorde al diseño de la envolvente).
- e. Época del año: día del calendario gregoriano acorde al lugar dónde se encuentra la envolvente verde. Lo anterior es útil para saber las épocas óptimas de fertilización, plantación, y todo aquello referente a fechas que influya a la envolvente verde.

### **3.7 Evaluación requerimientos de información mantención de envoltentes verdes**

Esta evaluación es consistente con el procedimiento realizado por Wan et al. (2004) para evaluar y desarrollar los modelos de información de análisis estructural basado en los requerimientos de información de SAP 2000. En dicha investigación se compararon los requerimientos de información necesarios para los procesos de análisis estructural de SAP 2000 con el modelo IFC para así evaluar la capacidad de éste para apoyar un análisis estructural.

Las Tablas 3-2 a la 3-5 identifican elementos y propiedades IFC existentes que podrían ser usadas para representar los requerimientos de información considerados para la mantención de envolventes verdes para cada tipo de sistema o elemento (Tabla 3-1). Estas tablas también incluyen los casos donde no se encontraron elementos IFC para representar los requerimientos de información y, por ende, se proponen entidades y propiedades (celdas que están en negrilla y cursiva). Además, para ciertos requerimientos de información se encontró más de una entidad, atributo o propiedad que los definieran.



Tabla 3-2: Requerimientos de información encontrados en IFC para soporte estructural y sistema de impermeabilización

Soporte estructural				Sistema impermeabilización
Tipo - Techo	Tipo - Muro	Subtipo	Materiales y orientación	Materiales
<p>IfcRoofType</p> <p>Elemento que define la información comúnmente compartida para los elementos del techos. El conjunto de información compartida puede incluir: propiedades comunes con conjuntos de propiedades compartidas, representaciones comunes, materiales comunes, composición común de los elementos. Se utiliza para definir una especificación del tipo de techo que indica la información específica del producto que es común a todas las apariciones de ese tipo de producto.</p>	<p>IfcWallType</p> <p>Elemento que define información compartida comúnmente para las paredes. El conjunto de información compartida puede incluir: Propiedades comunes dentro de los conjuntos de propiedades compartidas, información material común, definiciones comunes de la capa de material, representaciones de forma común.</p>	<p>IfcGreenWallSubtype</p> <p>Elemento que define el subtipo de muralla verde (fachada tradicional, guías continuas, enrejados modulares, pantallas ligeras, bandejas, vasijas, baldosas especiales para plantar y sacos permeables). Además especifica qué materiales son usados para cada subtipo, si tienen alguna necesidad especial estructural, sus resistencias, capacidades, permeabilidades, etc. Por último, indica qué superficie del subtipo de muro estarán colocadas las plantas (lo anterior, para poder saber qué orientación tendrán las plantas, a qué estarán expuestas, etc.)</p>	<p>IfcRoofType</p> <p>Elemento que define la información comúnmente compartida para los techos. El conjunto de información compartida puede incluir: propiedades comunes con conjuntos de propiedades compartidas, representaciones comunes, materiales comunes, composición común de los elementos. Se utiliza para definir una especificación del tipo de techo que indica la información específica del producto que es común a todas las apariciones de ese tipo de producto.</p>	
<p>IfcRoof</p> <p>Conjunto de elementos de un techo que agrega todas las partes (losas, vigas y correas, u otros techos incluidos, como buhardillas) con representación propia de la forma, o como un solo techo sin descomposición que incluye todas las representaciones de forma directamente en la entidad del techo.</p>	<p>IfcWall</p> <p>Elemento que se utiliza en particular para paredes con grosores cambiantes a lo largo de la trayectoria de la pared (por ejemplo, paredes poligonales), o paredes con secciones transversales no rectangulares y paredes con un eje de extrusión que es desigual al eje Z global del proyecto (es decir, paredes no verticales), o paredes que solo tienen la geometría 'Brep' o 'SurfaceModel'.</p> <p>IfcWallElementedCase</p> <p>Elemento que define una pared con ciertas restricciones para la provisión de sus componentes.</p>	<p>IfcPermeableCoveringProperties<sup>1</sup></p> <p>Esta entidad es una descripción de un panel dentro de una puerta o ventana (como rellenos para abrir) que permite el flujo de aire. Está dado por sus propiedades (IfcPermeableCoveringProperties). Una cubierta permeable es una ventana, como un componente, fijo o de apertura, que consiste esencialmente en un marco y el relleno. El relleno es normalmente una parrilla, una rejilla o una pantalla.</p>	<p>IfcWallType</p> <p>Elemento que define información compartida comúnmente para las paredes. El conjunto de información compartida puede incluir: Propiedades comunes dentro de los conjuntos de propiedades compartidas, información material común, definiciones comunes de la capa de material, representaciones de forma común.</p>	

<sup>1</sup> Dicha entidad no define en su totalidad a un subtipo de muralla verde pero sí puede aportar al requerimiento de información para el subtipo de sacos permeables.

Tabla 3-3: Requerimientos de información encontrados en IFC para sistema de riego

Sistema de riego				
Origen del agua	Tipo de sistema y materiales	Canales recuperación agua	Presión óptima	Áreas que alimenta
<p>Pset_MaterialWater</p> <p>Conjunto de propiedades para el agua típicamente utilizado dentro del contexto de servicios de construcción y sistemas de distribución de flujo.</p>	<p>IfcAlarm</p> <p>Elemento de dispositivo que indica la existencia de una condición o situación que está fuera de los límites de la expectativa normal o que activa dicho dispositivo. Las alarmas incluyen la provisión de botones de cristal de interrupción y cajas manuales de extracción que se utilizan para activar las alarmas.</p>	<p>Pset_FilterTypeWaterFilter</p> <p>Propiedades que califican el tipo de filtro de agua. La filtración elimina la materia no disuelta; La purificación elimina la materia disuelta; El ablandamiento reemplaza la materia disuelta.</p>	<p>Pset_FlowInstrumentTypePressureGauge</p> <p>Propiedades de un dispositivo que lee y muestra un valor de presión en un punto o la diferencia de presión entre dos puntos.</p>	<p>IfcPipeSegmentType</p> <p>Propiedades que definen información comúnmente compartida para los segmentos de tuberías. El conjunto de información compartida puede incluir: propiedades comunes con conjuntos de propiedades compartidas, representaciones comunes, materiales comunes, composición común de elementos, puertos comunes.</p>
	<p>IfcAlarmType</p> <p>Elemento que define información comúnmente compartida para las apariciones de alarmas. El conjunto de información compartida puede incluir: propiedades comunes con conjuntos de propiedades compartidas, representaciones comunes, materiales comunes, composición común de los elementos, puertos comunes.</p>			
	<p>Pset_SensorTypeFlowSensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que detecta el flujo.</p>			
	<p>Pset_SensorTypeHumiditySensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que detecta la humedad.</p>			
	<p>Pset_SensorTypeLightSensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que detecta la luz.</p>			
	<p>Pset_SensorTypeMoistureSensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que detecta la hidratación.</p>			
	<p>Pset_SensorTypePHSensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que detecta la acidez.</p>			
	<p>Pset_SensorTypeTemperatureSensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que detecta la temperatura.</p>			<p>IfcPipeSegment</p> <p>Entidad que define un segmento de tubería que se usa para unir típicamente dos secciones de una red de tuberías.</p>

Sistema de riego				
Origen del agua	Tipo de sistema y materiales	Canales recuperación agua	Presión óptima	Áreas que alimenta
	<p>Pset_ValveTypeCommon</p> <p>Atributos comunes del tipo de válvula.</p>			
	<p>Pset_ValveTypePressureReducing</p> <p>Propiedades de una válvula que reduce la presión de un fluido inmediatamente aguas abajo de su posición en una tubería a un valor preseleccionado o por una relación predeterminada.</p>			
	<p>Pset_PumpTypeCommon</p> <p>Atributos comunes del tipo de bomba.</p>			
	<p>Pset_PipeSegmentTypeCommon</p> <p>Atributos comunes del tipo de segmento de tubos o cañerías.</p>			

Tabla 3-4: Requerimientos de información encontrados en IFC para acceso a la envolvente

Acceso a envolvente		
Disponibilidad	Ubicación	Sistemas de seguridad
<p>IfcActionRequest</p> <p>Entidad que define una solicitud o la instancia de solicitar algo, como una solicitud de información, presentación de ofertas o desempeño del trabajo. Las solicitudes pueden tomar muchas formas, dependiendo de la necesidad, incluidos los informes de fallas para el mantenimiento, las solicitudes de trabajos pequeños y las solicitudes de compra (cuando se realicen a través de un servicio de asistencia o una función de compra).</p>	<p>IfcStair</p> <p>Elemento que define un pasaje vertical que permite a los ocupantes caminar (escalón) desde un nivel del piso a otro nivel del piso a una elevación diferente. Puede incluir un aterrizaje como una losa intermedia del piso.</p>	<p><i>Pset_SecuritySystem</i></p> <p><i>Propiedades pertenecientes al tipo de muro o techo que describen la seguridad necesaria (arnés, guantes, antiparras, casco, entre otros) para distintos tipos de mantenimiento. En el caso de las envolventes, se describirán las medidas de seguridad necesarias dependiendo de si se mantiene un techo o una muralla, la ubicación y altura de la envolvente, espacios que la delimita, etc.</i></p>
<p>Pset_ProjectOrderMaintenanceWorkOrder</p> <p>Propiedad que define una descripción detallada del trabajo de mantenimiento que se debe realizar.</p>	<p>Pset_ZoneCommon</p> <p>Propiedades comunes a la definición de todas las apariciones de IfcZone.</p>	
<p>Pset_WorkControlCommon</p> <p>Propiedades comunes a la definición de todas las apariciones de IfcWorkPlan e IfcWorkSchedule (subtipos de IfcWorkControl).</p>	<p>IfcSurface</p> <p>Elemento de representación bidimensional ubicado en el espacio tridimensional. Bidimensional significa que cada punto de la superficie se puede definir mediante un sistema de coordenadas bidimensional, generalmente mediante coordenadas u y v.</p>	
<p>IfcWorkTime</p> <p>Entidad que define los períodos de tiempo que utiliza IfcWorkCalendar para describir tiempos de trabajo. Además de las fechas de inicio y finalización, un conjunto de períodos de tiempo puede estar dado por varios tipos de patrones de recurrencia.</p>		

Tabla 3-5: Requerimientos de información encontrados en IFC para acceso sistema vegetal

Sistema vegetal				
Tipo especie vegetal	Tipo sustrato	Exposición	Tamaño	Época del año
<p><i>IfcPlantTypeSpecies</i></p> <p>Entidad que define el tipo de especie vegetal de la planta. Además, la información necesaria para cada especie vegetal: cantidad de riego que necesita, en qué clima y ubicación geográfica crece mejor, tipo de sustrato que necesita, recomendaciones para época de fertilización dependiendo del contexto geográfico, etc.</p>	<p><i>IfcSubstrateType</i></p> <p>Entidad que define el tipo de sustrato. Además define información respecto a qué tipo de especie vegetal es mejor ese sustrato, la cantidad necesaria para cada tipo de planta y sus dimensiones, etc.</p>	<p>Pset_SensorTypeSoundSensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que siente o detecta sonido.</p>	<p>IfcBoundedSurface</p> <p>Entidad que define una superficie acotada es una superficie de área finita con límites identificables.</p>	<p>IfcDateTime</p> <p>Entidad que identifica un punto particular en el tiempo, expresado por horas, minutos y segundos (opcionales) transcurridos dentro de un día del calendario, expresado por año, mes calendario y día en el mes.</p>
		<p>Pset_SensorTypeWindSensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que siente o detecta velocidad del viento y dirección.</p>	<p>IfcSurface</p> <p>Elemento de representación bidimensional ubicado en el espacio tridimensional. Bidimensional significa que cada punto de la superficie se puede definir mediante un sistema de coordenadas bidimensional, generalmente mediante coordenadas u y v.</p>	<p>IfcGeometricRepresentationContext</p> <p>Entidad que define el tipo de contexto en el que se definen las representaciones de forma y la precisión numérica aplicable a los elementos de representación geométrica definidos en este contexto. Además, se puede utilizar para compensar el sistema de coordenadas del proyecto desde un punto de origen global, utilizando el atributo WorldCoordinateSystem.</p>

		<p>Pset_SensorTypeLightSensor</p> <p>Propiedades de un dispositivo que siente o detecta luz.</p>		
--	--	--	--	--

El análisis descrito en las tablas previas muestra que la mayoría de los requerimientos de información existen en el modelo IFC como entidades o propiedades, otros se pueden inferir a través de la data de IFC y cuatro requerimientos en específico no se encuentran definidos. Los cuatro requerimientos anteriormente nombrados corresponden a: subtipo del soporte estructural, sistema de seguridad para el acceso a la envolvente verde y el tipo de especie vegetal y tipo de sustrato correspondientes al sistema vegetal. Para lo anterior se propuso las entidades `ifcPlantTypeSpecies`, `ifcSubstrateType`, `ifcGreenWallSubtype` y las propiedades `Pset_SecuritySystem`. El resultado del análisis significa que el modelo IFC no tiene entidades relacionadas a plantas y que tampoco tienen definido entidades que permitan analizar las correctas medidas de seguridad al estar realizando trabajos de construcción, mantención, entre otros, pero que efectivamente tiene definido la mayoría de los atributos necesarios para

incorporar la mantención de envolventes verdes a BIM.

A continuación, se define una tabla con el MVD propuesto para la mantención de envolventes verdes con las entidades, atributos y propiedades encontradas en IFC y propuestas.

Tabla 3-6: MVD propuesto para sistema estructural y riego

ACTIVIDADES		SISTEMAS O ELEMENTOS	
		Soporte estructural	Sistema riego
Planificar procesos de mantenimiento y control de gestión		<p>Tipo: IfcRoofType; IfcRoof; IfcWallType; IfcWall; IfcWallElementedCase Subtipo: <i>IfcGreenWallSubtype</i>; IfcPermeableCoveringProperties* Material: IfcRoofType; IfcWallType Orientación: IfcRoofType; IfcWallType</p>	<p>Origen del agua: Pset_MaterialWater Tipo de sistema: IfcAlarm; IfcAlarmType; Pset_SensorTypeFlowSensor; Pset_SensorTypeHumiditySensor; Pset_SensorTypeLightSensor; Pset_SensorTypeMoistureSensor; Pset_SensorTypePHSensor; Pset_SensorTypeTemperatureSensor; Pset_ValveTypeCommon; Pset_ValveTypePressureReducing; Pset_PumpTypeCommon; Pset_PipeSegmentTypeCommon Canales recuperación agua: Pset_FilterTypeWaterFilter Presión óptima: Pset_FlowInstrumentTypePressureGauge Materiales: IfcAlarm; IfcAlarmType; Pset_SensorTypeFlowSensor; Pset_SensorTypeHumiditySensor; Pset_SensorTypeLightSensor; Pset_SensorTypeMoistureSensor; Pset_SensorTypePHSensor; Pset_SensorTypeTemperatureSensor; Pset_ValveTypeCommon; Pset_ValveTypePressureReducing; Pset_PumpTypeCommon; Pset_PipeSegmentTypeCommon Áreas que alimenta: IfcPipeSegmentType; IfcPipeSegment</p>
Ejecutar activid. sobre otros sistemas	<b>Inspección</b>	Material: IfcRoofType; IfcWallType	<p>Origen del agua: Pset_MaterialWater Canales recuperación agua: Pset_FilterTypeWaterFilter Presión óptima: Pset_FlowInstrumentTypePressureGauge Materiales: IfcAlarm; IfcAlarmType; Pset_SensorTypeFlowSensor; Pset_SensorTypeHumiditySensor; Pset_SensorTypeLightSensor; Pset_SensorTypeMoistureSensor; Pset_SensorTypePHSensor; Pset_SensorTypeTemperatureSensor; Pset_ValveTypeCommon; Pset_ValveTypePressureReducing; Pset_PumpTypeCommon; Pset_PipeSegmentTypeCommon</p>

<p><b>Mantenimiento programado</b></p>	<p>-</p>	<p>Presión óptima:  Pset_FlowInstrumentTypePressureGauge  Materiales: IfcAlarm; IfcAlarmType;  Pset_SensorTypeFlowSensor;  Pset_SensorTypeHumiditySensor;  Pset_SensorTypeLightSensor;  Pset_SensorTypeMoistureSensor;  Pset_SensorTypePHSensor;  Pset_SensorTypeTemperatureSensor;  Pset_ValveTypeCommon;  Pset_ValveTypePressureReducing;  Pset_PumpTypeCommon;  Pset_PipeSegmentTypeCommon  Áreas que alimenta: IfcPipeSegmentType;  IfcPipeSegment</p>
<p><b>Reparación</b></p>	<p>Subtipo: <i>IfcGreenWallSubtype</i>;  IfcPermeableCoveringProperties*  Material: IfcRoofType; IfcWallType</p>	<p>Canales recuperación agua:  Pset_FilterTypeWaterFilter  Materiales: IfcAlarm; IfcAlarmType;  Pset_SensorTypeFlowSensor;  Pset_SensorTypeHumiditySensor;  Pset_SensorTypeLightSensor;  Pset_SensorTypeMoistureSensor;  Pset_SensorTypePHSensor;  Pset_SensorTypeTemperatureSensor;  Pset_ValveTypeCommon;  Pset_ValveTypePressureReducing;  Pset_PumpTypeCommon;  Pset_PipeSegmentTypeCommon</p>

Tabla 3-7: MVD propuesto para sistemas de impermeabilización y vegetal y acceso a la envolvente

ACTIVIDADES		SISTEMAS O ELEMENTOS		
		Acceso envolvente	Sistema impermeabilización	Sistema vegetal
<b>Planificar procesos de mantenimiento y control de gestión</b>		Disponibilidad: <i>IfcActionRequest</i> ; <i>Pset_ProjectOrderMaintenanceWorkOrder</i> ; <i>Pset_WorkControlCommon</i> ; <i>IfcWorkTime</i> Ubicación: <i>IfcStair</i> ; <i>Pset_ZoneCommon</i> ; <i>IfcSurface</i> Sistemas de seguridad: <i>Pset_SecuritySystem</i>	Materiales: <i>IfcRoofType</i> ; <i>IfcWallType</i>	Tipo especie vegetal: <i>IfcPlantTypeSpecies</i> Tipo sustrato: <i>IfcSubstrateType</i> Exposición: <i>Pset_SensorTypeSound</i> ; <i>Pset_SensorTypeWindSensor</i> ; <i>Pset_SensorTypeLightSensor</i> Tamaño: <i>IfcBoundedSurface</i> ; <i>IfcSurface</i> Época del año: <i>IfcDateTime</i> ; <i>IfcGeometricRepresentationContext</i>
Ejecutar activid. sobre otros sistemas	Inspección	Disponibilidad: <i>IfcActionRequest</i> ; <i>Pset_ProjectOrderMaintenanceWorkOrder</i> ; <i>Pset_WorkControlCommon</i> ; <i>IfcWorkTime</i> Ubicación: <i>IfcStair</i> ; <i>Pset_ZoneCommon</i> ; <i>IfcSurface</i>	Materiales: <i>IfcRoofType</i> ; <i>IfcWallType</i>	-
	Mantenimiento programado	-	-	-
	Reparación	Disponibilidad: <i>IfcActionRequest</i> ; <i>Pset_ProjectOrderMaintenanceWorkOrder</i> ; <i>Pset_WorkControlCommon</i> ; <i>IfcWorkTime</i> Ubicación: <i>IfcStair</i> ; <i>Pset_ZoneCommon</i> ; <i>IfcSurface</i> Sistemas de seguridad: <i>Pset_SecuritySystem</i>	Materiales: <i>IfcRoofType</i> ; <i>IfcWallType</i>	-
Ejecutar activid. sobre plantas	Control de plagas	-	-	Tipo especie vegetal: <i>IfcPlantTypeSpecies</i> Tipo sustrato: <i>IfcSubstrateType</i>
	Riego	-	-	Tipo especie vegetal: <i>IfcPlantTypeSpecies</i> Tipo sustrato: <i>IfcSubstrateType</i> Exposición: <i>Pset_SensorTypeSound</i> ; <i>Pset_SensorTypeWindSensor</i> ; <i>Pset_SensorTypeLightSensor</i> Orientación: <i>IfcRoofType</i> ; <i>IfcWallType</i>
	Fertilización	-	-	Tipo especie vegetal: <i>IfcPlantTypeSpecies</i> Tipo sustrato: <i>IfcSubstrateType</i> Época del año: <i>IfcDateTime</i> ; <i>IfcGeometricRepresentationContext</i>
	Poda	-	-	Tamaño: <i>IfcBoundedSurface</i> ; <i>IfcSurface</i>
	Desmalezado	-	-	Tipo especie vegetal: <i>IfcPlantTypeSpecies</i>
	Reemplazo de plantas	-	-	Tipo especie vegetal: <i>IfcPlantTypeSpecies</i>
	Fumigación	-	-	Tipo especie vegetal: <i>IfcPlantTypeSpecies</i> Tipo sustrato: <i>IfcSubstrateType</i>

### 3.8 Conclusiones

Este estudio identificó requerimientos básicos de información necesarios para planificar y ejecutar procesos de mantenimiento de envolventes verdes, y evaluó la capacidad del modelo de datos IFC para representar esa información en el contexto de modelos BIM. En base a este análisis, el estudio propone un MVD para el intercambio de información necesario para el uso de BIM como apoyo al mantenimiento de envolventes verdes.

Los resultados del estudio identificaron que el estándar IFC incluye la gran mayoría de los elementos y propiedades necesarias para representar los requerimientos de información. Las falencias de IFC están en la representación del sistema vegetal, acceso a envolventes y soporte estructural. Para lo anterior, se propusieron entidades y propiedades necesarias para poder definir un MVD que satisfaga los procesos de mantención de envolventes verdes.

Por otro lado, es importante mencionar que hay otra información que no fue incluida dentro de los requerimientos de información y, en consecuencia, tampoco en el MVD propuesto bajo el supuesto que debiera ser manejada en forma externa al modelo BIM. Esta información está relacionada, por ejemplo, con los indicadores de desempeño de los procesos de mantenimiento, cuadrillas responsables de las tareas, etc. Esta información debiera ser manejada en planillas o bases de datos en las que se incorpora la información extraída del modelo BIM a través del MVD propuesto.

Con respecto a la condición que el encargado del mantenimiento sea un actor externo a la organización dueña de la infraestructura, el estudio concluyó que esto no afecta la definición de los requerimientos de información ni, consecuentemente, la capacidad de IFC de representar esos requerimientos. Sin embargo, esta condición podría tener un impacto significativo en la implementación de este uso BIM ya que los procesos requerirán el traspaso de información entre actores.

Cabe destacar que también se estudió si COBie (MVD que se utiliza para la gestión de instalaciones) tenía lo requerido para poder incorporar la mantención de envolventes verdes. El análisis concluyó que COBie está orientado a sistemas específicos de climatización, plomería, extinción de incendios, y electricidad, entre otros, y por ende, no incluye algunos elementos fundamentales para la mantención de envolventes verdes como los sistemas vegetales.

Además de la contribución al conocimiento de los resultados de esta investigación, estos entregables también tienen un valor práctico para diversos actores. Los requerimientos de información pueden ser usados por empresas de mantenimiento para asegurarse de conseguir la información necesaria para planificar y ejecutar correctamente los procesos de mantenimiento. Estos requerimientos de información también pueden ser usados por desarrolladores de software orientado a servicios de mantenimiento de envolventes verdes.

La investigación se limitó sólo a la etapa de mantenimiento de las envolventes verdes por lo que el incorporar otras fases, como por ejemplo el diseño y construcción, podría agregar otras entidades, propiedades y atributos que en un

futuro podrían ser útiles para medir los impactos ambientales de las envolventes verdes en su entorno físico.

#### **4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

A través de la literatura revisada, se encontraron pocos casos de estudios e investigaciones que abarquen mantenciones a edificaciones realizadas por externos, como es el caso de las envolventes verdes. En la misma línea, se analizaron los procesos necesarios para poder realizar la mantención de envolventes verdes y cómo estos se definen y clasifican. Una vez revisado el estado del arte, se trabajó para ver cómo se podía incorporar la mantención de envolventes verdes a las metodologías BIM. Con respecto a que el encargado del mantenimiento de envolventes verdes sea un agente externo a la organización dueña de la edificación, se concluyó que esto no afecta la definición de los requerimientos de información y tampoco la capacidad del modelo de datos IFC de representar dichos requerimientos. A pesar de lo anterior, que los encargados del mantenimiento sean agentes externos, si podría tener implicancias en el uso de BIM debido a que será necesario un intercambio de información entre los distintos actores.

Cabe destacar que también se estudió si COBie (el cual es un MVD que específicamente se utiliza para la gestión de instalaciones) tenía lo requerido para poder incorporar la mantención de envolventes verdes, pero dicha línea se descartó ya que COBie está restringido a sistemas específicos (climatización, plomería, extinción de incendios, electricidad, entre otros) y por ende, la mantención de envolventes verdes no aplica a ninguno de los sistemas que se deben definir en dicho MVD.

Posteriormente se identificaron los requerimientos de información necesarios para el mantenimiento de envolventes verdes y luego éstos se clasificaron según el sistema o

elemento y acorde a la actividad correspondiente. Una vez definidos, se procedió a utilizar la metodología comparativa realizada por otro estudio de investigación para evaluar si efectivamente el modelo de datos IFC contenía los requerimientos necesarios para poder realizar la mantención de envolventes verdes. Se concluyó que IFC en su mayoría sí tiene definidas las entidades y propiedades correspondientes, pero que aún no existe la representación del sistema vegetal, acceso a envolventes y soporte estructural. Ante lo anterior, se propusieron entidades y propiedades (`ifcPlantTypeSpecies`, `ifcSubstrateType`, `ifcGreenWallSubtype` y `Pset_SecuritySystem`) para poder completar el MVD propuesto y que éste en un futuro pueda ser incorporado al modelo de datos IFC. Por lo que se puede concluir que BIM es capaz de apoyar la mantención de las envolventes verdes al incorporar nuevas entidades y propiedades al lenguaje IFC.

Las limitaciones de la investigación fueron la temporalidad de la aplicación de los indicadores de desempeño a las envolventes verdes (limitado a la estación primaveral), la estructuración de los procesos de mantenimiento por parte de los agentes que los realizan y, la evaluación de las condiciones de BIM para apoyar únicamente la fase de mantención, dejando otras fases de los proyectos de envolventes verdes de lado.

Por último, si se considera incorporar otras fases de las envolventes verdes como por ejemplo el diseño de éstas, se pueden agregar otras entidades, propiedades y atributos que en un futuro podrían ser útiles para medir los impactos ambientales de las envolventes verdes en su entorno físico.

**BIBLIOGRAFIA**

Arayici, Y., Onyenobi, T., & Egbu, C. (2012). Building Information Modelling (BIM) for Facilities Management (FM). *International Journal of 3-D Information Modeling*.

Asif, M. A., Muneer, T., & Kelley, R. (2007). Life cycle assessment: A case study of a dwelling home in Scotland. *Building and Environment* 42 (2007) 1391–1394, 42(3), 1391–1394.

Aziz, H. A., & Ismail, Z. (2011). Design guideline for sustainable green roof system. In *ISBEIA 2011 - 2011 IEEE Symposium on Business, Engineering and Industrial Applications* (pp. 198–203).

Banting, D., Doshi, H., Li, J., & Missious, P. (2005). *Report on the environmental benefits and costs of green roof technology for the city of Toronto. OCE-ETech*.

Becerik-Gerber, B., Jazizadeh, F., Li, N., & Calis, G. (2012). Application Areas and Data Requirements for BIM-Enabled Facilities Management. *Journal of Construction Engineering and Management*, 138(May), 431–442.

Bianchini, F., & Hewage, K. (2012). How “green” are the green roofs? Lifecycle analysis of green roof materials. *Building and Environment*, 48(1), 57–65.

Boddy, S., Rezgui, Y., Cooper, G., & Wetherill, M. (2007). Computer integrated construction: A review and proposals for future direction. *Advances in Engineering Software*, 38(10), 677–687.

Bonenberg, W., & Wei, X. (2015). Green BIM in Sustainable Infrastructure. *Procedia Manufacturing*, 3, 1654–1659.

Bos, P. (2012). Collaborative engineering with IFC: new insights and technology. *eWork*

*and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, 9th ECPPM Conference Proceedings*, 811–818.

BuildingSMART, I. L. (2016). IFC Overview Summary. Obtenido de: <https://www.buildingsmart.org/>.

Carbonari, G., & Jones, K. (2014). *Sustainable Facilities Management through Building Information Modelling. 13th EuroFM Research Symposium*.

Carbonari, G., Stravoravdis, S., & Gausden, C. (2015). Building information model implementation for existing buildings for facilities management: a framework and two case studies. In *WIT Transactions on The Built Environment* (Vol. 149, pp. 395–406). WIT Press.

Clark, C., Adriaens, P., & Talbot, F. B. (2008). Green roof valuation: a probabilistic economic analysis of environmental benefits. *Environmental Science & Technology*, 42(6), 2155–61.

Codinhoto, R. ., & Kiviniemi, A. . (2014). BIM for FM: A case support for business life cycle. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 442, 63–74.

Costin, A., Pradhananga, N., Teizer, J., & Marks, E. (2012). Real-time resource location tracking in Building Information Models (BIM). In *Lecture Notes in Computer Science (including subseries Lecture Notes in Artificial Intelligence and Lecture Notes in Bioinformatics)* (Vol. 7467 LNCS, pp. 41–48).

Dong, B., O'Neill, Z., & Li, Z. (2014). A BIM-enabled information infrastructure for building energy Fault Detection and Diagnostics. *Automation in Construction*, 44, 197–211.

East, B., & Carrasquillo-Mangual, M. (2012). „The COBie Guide: A Commentary to the

NBIMS-US COBie Standard “. *Building SMART Alliance*, 1–125.

East, E. W., Nisbet, N., & Liebich, T. (2012). The Facility Management Handover Model View. *Journal of Computing in Civil Engineering*, 27(February), 139.

Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., & Liston, K. (2011). *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modelling For Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors Second Edition*. John Willey & Son Inc (Vol. 1).

El-Mekawy, M., Östman, a, & Hijazi, I. (2012). An evaluation of ifc-citygml unidirectional conversion. *International Journal*, 3(5), 159–171.

Fillingham, V., Gulliver, S. R., & Nikolic, D. (2015). Building Information Modelling for the optimization of Facilities Management: A Case Study Review.

Fioretti, R., Palla, A., Lanza, L. G., & Principi, P. (2010). Green roof energy and water related performance in the Mediterranean climate. *Building and Environment*, 45(8), 1890–1904.

Fu, C., Aouad, G., Lee, A., Mashall-Ponting, A., & Wu, S. (2006). IFC model viewer to support nD model application. *Automation in Construction*, 15(2), 178–185.

Gao, G., Liu, Y. S., Wang, M., Gu, M., & Yong, J. H. (2015). A query expansion method for retrieving online BIM resources based on Industry Foundation Classes. *Automation in Construction*, 56, 14–25.

Getter, K. L., & Rowe, D. B. (2006). The role of extensive green roofs in sustainable development. *HortScience*, 41(5), 1276–1285.

Hajian, H., & Becerik-Gerber, B. (2010). Scan to BIM: factors affecting operational and computational errors and productivity loss. *27th International Symposium on Automation*

*and Robotics in Construction*, (Isarc), 265–272.

Jaffal, I., Ouldboukhitine, S.-E., & Belarbi, R. (2012). A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. *Renewable Energy*, 43, 157–164.

Kim, C., Lim, H., Kim, H., & Kim, H. (2013). Bim-Based Mobile System for Facility Management. *Proceedings of the 30th ISARC*, 749.

Laat, R. De, & Berlo, L. Van. (2011). Integration of BIM and GIS: The development of the CityGML GeoBIM extension. *Advances in 3D Geo-Information Sciences*, 211–225.

Lee, J., Smith, J., & Kang, J. (2011). The role of IFC for sustainable BIM data management. *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC)*, 764–769.

Lee, S. H., & Kim, B. G. (2011). IFC extension for road structures and digital modeling. In *Procedia Engineering* (Vol. 14, pp. 1037–1042).

Li, W. C., & Yeung, K. K. A. (2014). A comprehensive study of green roof performance from environmental perspective. *International Journal of Sustainable Built Environment*, 3(1), 127–134.

Lin, Y. H., Liu, Y. S., Gao, G., Han, X. G., Lai, C. Y., & Gu, M. (2013). The IFC-based path planning for 3D indoor spaces. *Advanced Engineering Informatics*, 27(2), 189–205.

Liu, R., & Issa, R. R. A. (2013). Issues in BIM for Facility Management from Industry Practitioners' Perspectives. *Computing in Civil Engineering*, 411–418.

Luckett, K. (2009). *Green Roof Construction and Maintenance*. McGrawHills GreenSource series.

- MacIvor, J. S., & Lundholm, J. (2011). Performance evaluation of native plants suited to extensive green roof conditions in a maritime climate. *Ecological Engineering*, 37(3), 407–417.
- Magill, J. D., Midden, K., Groninger, J., & Therrell, M. (2011). A History and Definition of Green Roof Technology with Recommendations for Future Research. *Department of Plant, Soil, and Agricultural Systems in the Graduate School, Master of*, 62.
- Manso, M., & Castro-Gomes, J. (2014). Green wall systems: A review of their characteristics. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- Motamedi, A., Hammad, A., & Asen, Y. (2014). Knowledge-assisted BIM-based visual analytics for failure root cause detection in facilities management. *Automation in Construction*, 43, 73–83.
- Motawa, I., & Almarshad, A. (2013). A knowledge-based BIM system for building maintenance. *Automation in Construction*, 29, 173–182.
- Nicał, A. K., & Wodyński, W. (2016). Enhancing Facility Management through BIM 6D. In *Procedia Engineering* (Vol. 164, pp. 299–306).
- Niu, H., Clark, C., Zhou, J., & Adriaens, P. (2010). Scaling of economic benefits from green roof implementation in Washington, DC. *Environmental Science and Technology*, 44(11), 4302–4308.
- Pazlar, T., & Turk, Ž. (2008). Interoperability in practice: Geometric data exchange using the IFC standard. *Electronic Journal of Information Technology in Construction*, 13, 362–380.
- Peck, S. W., Callaghan, C., Kuhn, M. E., & Bass, B. (1999). Greenbacks from green roofs: Forging a new industry in Canada status report on benefits, barriers and opportunities for

green roof and vertical garden technology diffusion. *Environment*, (March), 78.

Pérez, G., Rincón, L., Vila, a, González, J. M., & Cabeza, L. (2011). Energy efficiency of green roofs and green façades in mediterranean continental climate. *Energy Conversion and Management*, 52, 1861–1867.

Perini, K., Ottelé, M., Haas, E. M., Raiteri, R., & Ungers, O. M. (2011). Greening the building envelope , façade greening and living wall systems. *Open Journal of Ecology*, 1(1), 1–8.

Perini, K., & Rosasco, P. (2013). Cost-benefit analysis for green fa?ades and living wall systems. *Building and Environment*, 70, 110–121.

Qin, L., Deng, X. Y., & Liu, X. La. (2011). Industry foundation classes based integration of architectural design and structural analysis. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, 16(1), 83–90.

Ruckert, F., & Mourgues, C. (2017). *Assesing the Maintenance Processes of Green Envelopes*. Pontificia Universidad Católica de Chile.

Sailor, D. J. (2008). A green roof model for building energy simulation programs. *Energy and Buildings*, 40(8), 1466–1478.

Schley, M., Teicholz, P., & Lewis, A. (2013). BIM for Facility Managers. *Ifma*, 352.

Shen, W., Hao, Q., & Xue, Y. (2012). A loosely coupled system integration approach for decision support in facility management and maintenance. *Automation in Construction*, 25, 41–48.

Silva, C. M., Flores-Colen, I., & Coelho, A. (2015). Green roofs in Mediterranean areas - Survey and maintenance planning. *Building and Environment*, 94(P1), 131–143.

Sodagar, B., & Fieldson, R. (2007). Towards a sustainable construction practice. *Construction Information Quarterly*, 10(3), 101–108.

Speak, A. F., Rothwell, J. J., Lindley, S. J., & Smith, C. L. (2013). Reduction of the urban cooling effects of an intensive green roof due to vegetation damage. *Urban Climate*, 3, 40–55.

Vanlande, R., Nicolle, C., & Cruz, C. (2008). IFC and building lifecycle management. *Automation in Construction*, 18(1), 70–78.

Veisten, K., Smyrnova, Y., Klæboe, R., Hornikx, M., Mosslemi, M., & Kang, J. (2012). Valuation of green walls and green roofs as soundscape measures: Including monetised amenity values together with noise-attenuation values in a cost-benefit analysis of a green wall affecting courtyards. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 9(11), 3770–3778.

Wan, C., Chen, P., & Tiong, R. L. K. (2004). Assessment of IFC for structural analysis domain. *ITcon*, 9(May), 75–95.

Weise, M., Liebich, T., Tulke, J., & Bonsma, P. (2009). IFC Support for Model-based Scheduling. *26th CiB W78 Conference - Managing IT in Construction/Managing Construction for Tomorrow*, 8.

Wong, J. K. W., & Zhou, J. (2015). Enhancing environmental sustainability over building life cycles through green BIM: A review. *Automation in Construction*.

Zhang, J., Yu, F., Li, D., & Hu, Z. (2014). Development and implementation of an industry foundation classes-based graphic information model for virtual construction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 29(1), 60–74.

Zhiliang, M., Zhenhua, W., Wu, S., & Zhe, L. (2011). Application and extension of the IFC standard in construction cost estimating for tendering in China. *Automation in Construction*, 20(2), 196–204.