



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

Elaboración de métricas basada en un *framework* de atributos para líneas de productos

León Daniel Jaramillo Ramírez

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión

Medellín, Colombia

2015

Elaboración de métricas basada en un *framework* de atributos para líneas de productos

León Daniel Jaramillo Ramírez

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería de Sistemas

Director (a):

Ph.D. Gloria Lucía Giraldo Gómez

Codirector (a):

Ph.D. Raúl Mazo

Línea de Investigación:

Ingeniería de Líneas de Productos

Grupo de Investigación:

Grupo de Ingeniería de Software

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Ciencias de la Computación y de la Decisión

Medellín, Colombia

2015

A mis padres.

Agradecimientos

Quisiera agradecer a todas las personas que de una u otra manera me brindaron su apoyo en este proyecto.

En primer lugar quisiera agradecer muy sinceramente a la profesora Gloria Lucía Giraldo y al profesor Raúl Mazo, quienes con su guía y sus consejos de toda índole me hicieron crecer como investigador y como persona. A ellos, que no escatimaron en regalarme su tiempo y mucho de su conocimiento.

Quisiera agradecer también al profesor Germán Urrego, quien fue un apoyo clave en esta labor investigativa. No solo me ofreció su conocimiento y sus consejos, sino también su apoyo para desarrollar mi trabajo sin contratiempos.

También quisiera agradecer a la Universidad Nacional de Colombia, a la Universidad de Antioquia y a Colciencias, entidades que, de una u otra manera, proporcionaron los medios financieros que aportaron para llevar a feliz término este trabajo.

Quisiera agradecer también a los compañeros del Grupo ITOS, entre ellos José Ignacio y Sebastián, quienes hicieron mucho más amenas las jornadas de investigación. Al CRI (Centre de Recherche en Informatique) de la Sorbona, en cabeza de Camille Salinesi, por su acogida en mi estadía académica en Francia. Además, a Jose y Eugenie Gonçalves, por su hospitalidad durante mi periplo en París.

Finalmente, quisiera agradecer enormemente a mis padres, Estela y Leonardo, a mis hermanas, Yicel, Paola y Eliza, y a mi novia Katherine, quienes con su paciencia, apoyo y afecto, me acompañaron a lo largo de este arduo trabajo.

Resumen

Una línea de productos es un conjunto de productos relacionados que comparten unas características comunes, así como una variabilidad. Lo anterior facilita la producción masiva de dichos productos además de su adaptación a requisitos particulares. La ingeniería de líneas de productos es un paradigma de producción que permite la personalización masiva de productos. Esto ayuda a una mayor reutilización de componentes, a disminuir el tiempo de desarrollo y a mejorar la calidad final de los productos.

Como en cualquier rama de la ingeniería, en la ingeniería de líneas de productos la medición juega un papel clave. Esto permite una mejor gestión de los procesos y los recursos requeridos por estos, así como monitorear la calidad de los productos. Este proceso se implementa mediante el uso de métricas, que permiten tener una medida cuantitativa del grado en el que un sistema, componente o proceso poseen un atributo dado (como costo, mantenibilidad o complejidad).

Sin embargo; ni la comunidad académica ni la industria, cuentan con un *framework* para la aplicación de métricas en líneas de productos. Además, en la ingeniería en general y particularmente en la ingeniería de software, no existe un consenso en la terminología ni en una metodología de medición. Todo esto lleva a que se presenten dificultades, tanto para la definición como para la validación de métricas, en la ingeniería de software y en la ingeniería de líneas de productos.

Durante el desarrollo del presente trabajo se propone un *framework* de medición, enfocado en los atributos, para la ingeniería de líneas de productos. También se define un conjunto de métricas con base en dicho *framework*.

El trabajo propuesto comprende un mapeo sistemático de la literatura sobre la medición en la ingeniería de líneas de productos, un *framework* de medición centrado en un conjunto de atributos extraídos de la ingeniería de líneas de productos, un conjunto de métricas para líneas de productos y la correspondiente validación de dichas métricas con un análisis teórico

Palabras clave: líneas de productos, medición, métrica, atributo.

Abstract

A product line is a set of related products that share some common features and variable ones. It allows the massive production of those products besides their adaptation to particular requirements. Product line engineering is a production paradigm that implies mass customization of products. It helps to a greater reuse of components, to decrease the time of development and to improve the final quality of products.

Like in any other engineering branch, in product line engineering measurement has a key role. It allows a better management of the processes and the resources required by them, as well as to monitor the quality of the products. This process is implemented through the use of metrics, which allow to have a quantitative measure of the degree in which a system, component or process possesses a given attribute (like cost, maintainability or complexity).

However, neither the academy nor the industry have a *framework* for using metrics in product lines. Although, in engineering but mainly in software engineering, there is not a consensus in a measurement terminology or in a measurement methodology. All this has led to some difficulties in the definition and the validation of metrics in software engineering and in product line engineering.

In this work, we propose a measurement *framework* for product line engineering focused on attributes. We also define a set of metrics based on this *framework*.

The proposed work includes a systematic mapping about measurement in product line engineering, a measurement *framework* focused on the attributes of the product lines, a set of metrics for product lines and the validation of those metrics with a theoretical analysis.

Keywords: product lines, measurement, metric, attribute.

Contenido

	Página
Justificación	1
Planteamiento del problema	2
Preguntas de investigación	3
Objetivos.....	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
Metodología.....	3
Alcance.....	4
Contribuciones.....	5
Estructura de la tesis	6
1. Marco teórico.....	7
1.1 Líneas de productos.....	7
1.1.1 Líneas de productos de software.....	8
1.1.2 Ingeniería de líneas de productos.....	9
1.1.3 Modelos de líneas de productos	12
1.2 Medición.....	14
1.2.1 Medición en la ingeniería de software.....	14
1.2.2 Medición en la ingeniería de líneas de productos	17
2. Estudio de la literatura sobre la medición en líneas de productos: un mapeo sistemático	19
2.1 Método de investigación.....	19
2.1.1 Caracterización propuesta	20
2.1.2 Objetivos.....	22
2.1.3 Preguntas de investigación	23
2.1.4 Conducción del estudio.....	23
2.1.5 Búsqueda manual.....	26
2.1.6 Búsqueda automática	27
2.1.7 Extracción de datos	28
2.2 Resultados	29
2.2.1 Publicaciones en el área de estudio.....	30
2.2.2 Medición en la ingeniería de líneas de productos	35
2.3 Análisis y discusión	44
2.4 Trabajos relacionados	45
3. Solución propuesta.....	47
3.1 <i>Framework</i> para la medición en la ingeniería de líneas de productos.....	47
3.1.1 Antecedentes.....	47

3.1.2	Modelo propuesto.....	49
3.1.3	Pautas para la definición de una métrica.....	53
3.2	Definición de métricas en ILP utilizando el <i>framework</i> propuesto.....	60
3.2.1	Porcentaje de configuración de producto.....	60
3.2.2	Grado de reusabilidad de una característica	61
3.2.3	Grado de implementación del dominio	63
4.	Validación.....	65
4.1	Análisis teórico.....	65
4.1.1	Validez del atributo.....	65
4.1.2	Validez de la unidad	67
4.1.3	Validez del instrumento	68
4.1.4	Validez del protocolo	69
4.2	Conclusiones	69
5.	Conclusiones y trabajo futuro	71
5.1	Conclusiones	71
5.2	Trabajo futuro	72

Lista de figuras

	Página
Figura 1-1: Economía de la Ingeniería de Líneas de Productos. Traducida de Schmid y Verlage [24].	9
Figura 1-2: Ciclo de vida de una línea de productos. Adaptada de Apel <i>et al.</i> [25]...	10
Figura 2-1: Proceso de ejecución de un <i>systematic mapping study</i> . Traducido del trabajo de Petersen <i>et al.</i> [14].....	20
Figura 2-2: <i>Framework</i> propuesto para la caracterización de los artículos. Fuente: Elaboración propia.	22
Figura 2-3: Proceso de <i>screening</i> (Adaptado de Petersen <i>et al.</i> [14]).	25
Figura 2-4: Distribución temporal de los artículos.	30
Figura 2-5: Sitios de publicación.	31
Figura 2-6: Artículos por tipo de publicación.	31
Figura 2-7: Principales revistas científicas sobre medición en ILP.	32
Figura 2-8: Principales conferencias sobre medición en ILP.	32
Figura 2-9: Libros con más estudios sobre medición en ILP.	32
Figura 2-10: Número de estudios (eje y) por país (eje x).	33
Figura 2-11: Participantes en estudios sobre medición en ILP.	34
Figura 2-12: Principales autores (eje y) de estudios (eje x) sobre medición en ILP....	34
Figura 2-13: Clase de investigación de los estudios.	35
Figura 2-14: Atributos más estudiados en la literatura de la medición de las LPs.	36
Figura 2-15: Ámbito de la medición.	37
Figura 2-16: Notaciones de modelado más usadas.	38
Figura 2-17: Medidas objetivas o subjetivas.	39
Figura 2-18: Medidas directas o indirectas.	39
Figura 2-19: Tipos de escala en la medida.	40
Figura 2-20: Escalas utilizadas.	40
Figura 2-21: Etapa en el ciclo de vida de la LP.	41
Figura 2-22: Tipo de entidad medida.	41
Figura 2-23: Tipo de línea de productos.	41
Figura 2-24: Validación teórica.	42
Figura 2-25: Tipo de validación empírica.	43
Figura 3-1: <i>Framework</i> para la medición en la ingeniería de líneas de productos. Fuente: Elaboración propia.....	50
Figura 3-2: Representación del paradigma <i>Goal/Question/Metric</i> (GQM). Fuente: Adaptado de Basili [53].....	54

Lista de tablas

	Página
Tabla 2-1: Lista de <i>journals</i> consultados en la búsqueda manual.	26
Tabla 2-2: Lista de conferencias consultadas en la búsqueda manual.....	26
Tabla 2-3: Lista de <i>workshops</i> consultados en la búsqueda manual.....	27
Tabla 3-1: Atributos medidos en ingeniería de líneas de productos.	55
Tabla 3-2: Lenguajes de modelado usados en la medición en ingeniería de líneas de productos. 58	
Tabla A-1: Artículos seleccionados en el mapeo sistemático de literatura.....	74

Glosario

Abreviación	Término
LP	Acrónimo para línea de productos.
LPS	Acrónimo para línea de productos de software
ILP	Acrónimo para ingeniería de líneas de productos

Introducción

En el presente capítulo se hace una introducción al trabajo desarrollado en la presente tesis.

Justificación

El uso de *líneas de productos* trae varios beneficios al proceso de desarrollo de productos de software y de otros tipos. Entre sus beneficios se encuentran la reducción de costos, el mejoramiento de la calidad de los productos resultantes y la disminución del tiempo de salida al mercado [1]. Es por esto que la *ingeniería de líneas de productos* (ILP) se ha convertido en un acercamiento importante y cada vez más utilizado para el desarrollo eficiente de productos en general y de sistemas de software en particular [1]. Por su parte, la *medición* es un proceso de gran importancia en cualquier rama de la ingeniería, esta importancia la explica DeMarco [2] en una frase: “No se puede controlar lo que no se puede medir”. La ingeniería de líneas de productos no es la excepción; en ésta, el proceso de medición reviste gran importancia y existe una tendencia creciente en su uso [3].

Sin embargo, detrás del proceso de medición, debe haber una definición apropiada de las métricas que se van a utilizar, así como un trasfondo conceptual y terminológico claro [4]. Para ello se han propuesto diversas herramientas conceptuales [5] y marcos de trabajo [6] que facilitan la definición de las mismas. Así también, la validación apropiada de dichas métricas, si bien no es generalizada [3], también reviste gran importancia.

La medición, y por consiguiente la definición de métricas en la ingeniería de líneas de productos, debe hacerse de una manera más cuidadosa que en la ingeniería de software tradicional. Debido a que se utilizan artefactos diferentes y a que al tratarse de conjuntos de productos en lugar de uno solo, el monitoreo de la calidad y los procesos es más crítico y determinante en el resultado final [1]. Sin embargo, en la revisión literaria presentada posteriormente en este trabajo, no se encontró un *framework* que caracterice los procesos realizados y los atributos a medir en líneas de productos de software.

Es por esto que en el presente trabajo se realiza una caracterización de las métricas y atributos en la ingeniería de líneas de productos y, con base en lo anterior, se propone un *framework* conceptual que sirve de soporte para la definición de nuevas métricas.

Planteamiento del problema

En la ingeniería de líneas de productos se ha propuesto un conjunto de métricas en diversas etapas del ciclo de vida. Algunas de éstas miden atributos como la calidad [3], la complejidad [7] o el costo [8]. A pesar de ello, de acuerdo a la revisión de literatura hecha para este trabajo, ni la comunidad académica ni la industria, cuentan con un *framework* de atributos medibles en líneas de productos. Se han propuesto marcos de medición particulares a ciertas áreas, tanto en entornos industriales y de manufactura [9], como en estudios académicos enfocados en la modularidad [10] o en la medición de los activos del núcleo (*core assets* en inglés) [11]. La existencia de un *framework* de atributos no solo reforzaría el marco conceptual de la ingeniería de líneas de productos sino que también facilitaría la definición, aplicación y validación de métricas. Lo anterior se evidencia en la dificultad de la elección de atributos sobre los cuales desarrollar métricas, y en el proceso poco claro mediante el cual se definen y validan las mismas.

La falta de este *framework* lleva al desarrollo de métricas particulares en un entorno de aplicación inmediata dentro de la ingeniería de líneas de productos. Así pues, existen métricas que solo pueden ser aplicadas a entornos manufactureros [9]. Se pueden encontrar también métricas que solo pueden asociarse a ciertos atributos según el campo de aplicación, por ejemplo, la métrica de Rendimiento [12], la cual tiene un significado diferente en líneas de productos de software y en líneas de productos en general. Finalmente, es común encontrar en la literatura métricas donde se pasan por alto criterios clave a la hora de definir las, como por ejemplo definir el modelo sobre el que se desarrolla la medición o definir en cuál etapa del ciclo de vida se aplican las mediciones.

A lo anterior se suma el poco rigor con el que en muchos casos se hace la validación empírica de las métricas definidas [3], [13]. No en todos los estudios se lleva a cabo este procedimiento, y en muchos de los que si se hace, el diseño de dicha validación no permite apreciar la efectividad al medir un atributo específico [3].

Preguntas de investigación

En esta tesis se abordan las limitaciones mencionadas anteriormente por medio de las siguientes preguntas de investigación:

1. ¿Cómo caracterizar los atributos medibles en una línea de productos?
2. ¿Cómo definir un *framework* de medición genérico para líneas de productos?
3. ¿Cómo definir métricas con base en el *framework* anterior?
4. ¿Cómo se validan de forma confiable las métricas propuestas anteriormente?

Objetivos

Objetivo general

Definir un conjunto de métricas usando un *framework* genérico y propio de atributos medibles para líneas de productos.

Objetivos específicos

- Realizar una caracterización de los atributos de las líneas de productos, considerados por las métricas existentes actualmente.
- Elaborar un *framework* para la medición de líneas de productos.
- Tomando como base el *framework* anterior, definir un conjunto de métricas que midan atributos ya sea desatendidos por las métricas existentes o en los cuales éstas no tengan una validación adecuada.
- Llevar a cabo una validación mediante un análisis teórico para cada una de las métricas propuestas en el presente trabajo.

Metodología

En esta tesis, el trabajo investigativo se lleva a cabo en cuatro etapas:

1. Revisión sistemática de literatura.
2. Definición del *framework* de medición.
3. Definición de métricas con base en el *framework* definido previamente.
4. Validación de las métricas propuestas.

Para la revisión sistemática de literatura, se lleva a cabo un *Systematic Mapping Study* (SMS). Con este fin, se sigue el procedimiento propuesto en los trabajos de Petersen *et al.* [14] y de Kitchenham & Charters [15]. En estos trabajos, los autores sientan las directrices para la elaboración de revisiones sistemáticas de la literatura en ingeniería de software, de manera similar a como se hace en las ciencias médicas. A grandes rasgos, esta metodología comprende las siguientes etapas:

- a. Definición de un protocolo para el procedimiento.
- b. Identificación los estudios (en bruto) a utilizar.
- c. Definición de políticas de calidad en la selección de estos estudios.
- d. Selección de estudios pertinentes.
- e. Extracción de datos.
- f. Síntesis de datos.
- g. Reporte de resultados.

En las etapas de la definición del *framework* de medición y la definición de las métricas, se usa una adaptación de la metodología *Design science*, propuesta por Fuller & McHale [16]. A continuación, se listan algunas pautas a seguir a la hora de aplicar esta metodología en investigación sobre sistemas de información, propuestas por Hevner *et al.* [17]:

1. Definir el artefacto central del diseño.
2. Dimensionar la relevancia del problema.
3. Hacer una evaluación efectiva del diseño.
4. Definir claramente las contribuciones de la investigación efectuada.
5. Cuidar el rigor de los métodos usados particularmente en el diseño del artefacto.
6. Diseñar con un objetivo claro, usando los medios apropiados.
7. Realizar una comunicación efectiva de los resultados de la investigación.

En la validación de las métricas propuestas se realiza un análisis teórico. Para tal fin, se usa la metodología de validación teórica propuesta por Kitchenham *et al.* [18].

Alcance

Este trabajo de investigación está demarcado por los siguientes alcances:

- Una caracterización de los principales aspectos que comprenden la medición en la ingeniería de líneas de productos. Esto se obtiene como resultado de una revisión sistemática de literatura.
- Un *framework* de medición que capitaliza la caracterización anterior. Este comprende un marco conceptual y unas pautas que facilita la definición y aplicación de métricas en la ingeniería de líneas de productos. Si bien el *framework* hace uso de conceptos relacionados con la medición en la ingeniería de software tradicional, no está construido para ser usado en esta área de estudio.
- Un conjunto de métricas aplicables en la ingeniería de líneas de productos, definidas con base en el *framework* referido anteriormente. Aunque existen métricas definidas para la ingeniería de líneas de productos que pueden ser utilizadas en la ingeniería de software tradicional con pocas modificaciones, las métricas definidas en el presente trabajo son de uso exclusivo en la ingeniería de líneas de productos.
- La validación teórica de las métricas propuestas. Si bien este procedimiento corrobora la validez teórica de las métricas, es necesario llevar a cabo una validación empírica con casos de estudio industriales para que se consideren completamente validadas.

Contribuciones

Las principales contribuciones de esta tesis son las siguientes:

1. Se lleva a cabo una caracterización exhaustiva del proceso de medición en la ingeniería de líneas de productos. Esto se logra realizando un *Systematic Mapping Study* (SMS), el cual permite seguir un proceso sistemático, repetible y verificable. Esta caracterización da un panorama general de los diferentes aspectos que comprenden la medición en la ingeniería de líneas de productos. Además, pone en evidencia brechas de investigación en el área de estudio.
2. Se propone un *framework* de medición para la ingeniería de líneas de productos. Si bien existen *frameworks* de medición tanto para la ingeniería de software [18][19][6] como para determinados aspectos de las líneas de productos [11], no

se encontraron *frameworks* que, como el expuesto en el presente trabajo, se ocuparan de la definición y aplicación de métricas en todo el ciclo de vida de las líneas de productos.

3. Se propone un conjunto de métricas aplicables en la ingeniería de líneas de productos. Adicionalmente, se validaron las métricas propuestas, lo que constituye un paso hacia su uso en entornos académicos e industriales.

Estructura de la tesis

Esta tesis está organizada de la siguiente manera: En el Capítulo 1 se presenta el marco teórico relacionado con las líneas de productos y el proceso de medición. El Capítulo 2 está dedicado a una revisión sistemática de literatura siguiendo la metodología *Systematic Mapping Study* (SMS). En el Capítulo 3 se presenta la principal contribución de esta tesis; esto es, un *framework* para la medición en ingeniería de líneas de productos, así como un conjunto de métricas que ilustran su uso. El Capítulo 4 se ocupa de un análisis teórico encaminado a la validación de las métricas propuestas anteriormente. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones y el trabajo futuro que se deriva de este trabajo de investigación.

1. Marco teórico

1.1 Líneas de productos

Después de la revolución industrial, se generó una demanda creciente de productos manufacturados. Esto a su vez impulsó el desarrollo de técnicas que permitieran disminuir costos y tiempos en la fabricación de bienes. Estas técnicas constituyen lo que se conoce como **producción en masa** [20]. A pesar de sus beneficios, este paradigma no da lugar a variaciones en los productos. Esto implica que los bienes producidos se ajustaban siempre a un modelo específico de producto, sin variaciones de ninguna clase. Con el tiempo, los consumidores comenzaron a buscar productos que no solo tuvieran precios bajos, sino que también se adaptaran a sus necesidades. Es en este contexto en el que surgió la **personalización en serie** (*mass customization*) [20], la cual consiste en la gestión de la producción de un conjunto o familia de productos que tienen tanto características comunes, como características variables. A su vez la personalización en serie dio lugar a las **plataformas de productos**, que son conjuntos de componentes, módulos o partes comunes a partir de las cuales se pueden producir y lanzar un conjunto de productos [21].

En este contexto, las líneas de productos surgieron como una alternativa para la gestión eficiente de productos que cuentan tanto con características comunes, como con características variables. Una **línea de productos** se puede definir como un grupo de productos relacionados que se deriva de una plataforma de productos para satisfacer una variedad de nichos de mercado [9]. Por su parte Clements y Northrop [22] definen una línea de productos como “un conjunto de productos direccionados a un segmento de mercado particular, o que están desarrollados para cubrir una misión específica”. El hecho de que los productos de una línea de productos cuenten con características comunes, favorece la reutilización. Y el que estos cuenten con características particulares que los diferencien posibilita la variabilidad.

1.1.1 Líneas de productos de software

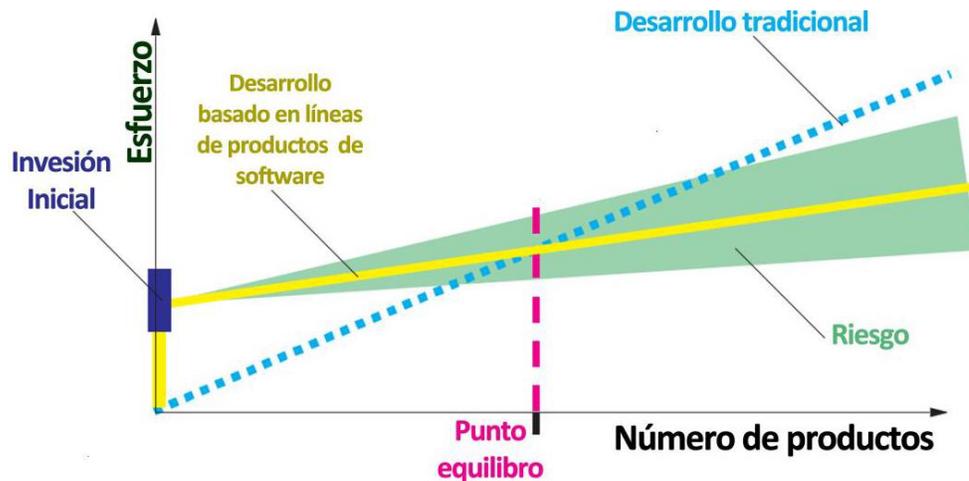
En el desarrollo de software, la reutilización juega un papel clave. En esta disciplina es común que los desarrolladores reutilicen artefactos, modelos, componentes o fragmentos de código entre una aplicación y otra. Comúnmente, la reutilización en el desarrollo de software se hace con un enfoque oportunista, es decir, no planeado, lo que lleva a la necesidad de administrar un conjunto de productos diferentes por separado, en lugar de un grupo de componentes comunes a reutilizar [22].

En contraposición a la reutilización oportunista, surgen las líneas de productos de software. Una **línea de productos de software** se define como “un grupo de aplicaciones similares dentro de un segmento de mercado que comparten un conjunto de requisitos comunes pero que también cuentan con variabilidad significativa en algunos requisitos” [23][22]. El que dichas aplicaciones pertenezcan a un segmento de mercado específico permiten que cuenten con requisitos y características comunes que pueden ser reutilizados en todas ellas. A su vez, la variabilidad presente en otros requisitos y características implica que haya una diferenciación entre las aplicaciones, permitiendo ofrecer productos distintos dentro del mismo nicho de mercado.

El desarrollo de software bajo el paradigma de las líneas de productos permite la reutilización de componentes de forma no oportunista y planificada. Esto lleva a la disminución de tiempos y de costos en el desarrollo de nuevos productos, ya que posibilita el que estos no sean desarrollados siempre desde cero.

Existen diferentes enfoques para adoptar el desarrollo basado en líneas de productos. En cualquier caso, el costo inicial del desarrollo de software durante la adopción es más alto que en el desarrollo de software tradicional. Esto debido a las actividades de planeación que requiere el paradigma de líneas de productos de software. También se debe al desarrollo planeado de artefactos y componentes comunes que se lleva a cabo en un principio. Sin embargo, estos costos se amortizan a medida que se derivan productos de la línea de productos [24]. La Figura 1-1 presenta el comportamiento económico de las líneas de productos de software cuando la línea de productos de software inicia en la planeación y no se tiene ningún producto de software desarrollado.

Figura 1-1: Economía de la Ingeniería de Líneas de Productos. Traducida de Schmid y Verlage [24].



1.1.2 Ingeniería de líneas de productos

La **ingeniería de líneas de productos (ILP)** surgió como un paradigma que busca aprovechar eficientemente las similitudes y las variaciones presentes en el conjunto de productos que constituyen una línea de productos [1]. Dentro de la ingeniería de líneas de productos se distinguen dos procesos: la ingeniería del dominio y la ingeniería de aplicación.

La **ingeniería del dominio** es el proceso en el que se realiza el análisis del dominio de una línea de productos y el desarrollo de artefactos reutilizables [25]. El resultado de este proceso no es un conjunto de productos, sino un conjunto de artefactos y componentes comunes que serán reutilizados en los productos de la línea de productos. Es en la ingeniería del dominio donde se definen tanto la variabilidad, como los elementos comunes de toda línea de productos, usando artefactos como los modelos de variabilidad y definiendo componentes reutilizables.

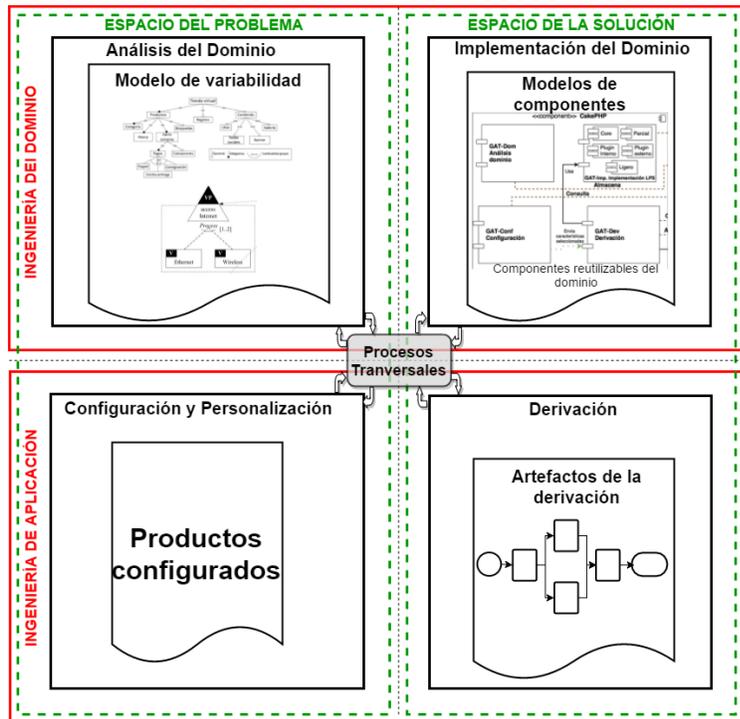
Por su parte, la **ingeniería de aplicación** tiene como objetivo el desarrollo de productos específicos, atendiendo requisitos particulares [25]. Éste proceso se asemeja al desarrollo de una aplicación de software con un enfoque tradicional, pero reutilizando, siempre que sea posible, artefactos y componentes producidos en la ingeniería de dominio.

Por otro lado, la ILP se puede abordar desde dos perspectivas: la perspectiva de los clientes o interesados (*stakeholders*) y la del vendedor o desarrollador. Estas perspectivas se denominan, respectivamente, el espacio del problema y el espacio de la solución.

El **espacio del problema** se refiere a especificaciones del sistema definidas durante el análisis del dominio y el proceso de ingeniería de requisitos. De hecho las características, definidas posteriormente, son abstracciones del dominio que caracterizan esta perspectiva. Por su parte, el **espacio de la solución** se refiere a los artefactos creados durante las fases de especificación de la arquitectura, de diseño y de implementación [26]. Por lo anterior, a esta perspectiva la caracterizan artefactos como los componentes y las interfaces.

Los dos procesos y las dos perspectivas explicadas previamente, se complementan entre sí para la definición de un proceso de desarrollo de líneas de productos. Como se observa en la Figura 1-2, el ciclo de vida de una línea de productos se puede representar mediante una estructura bidimensional en la cual se presentan cuatro fases o grupos de procesos [25]. Estas fases son: el análisis del dominio, la implementación del dominio, la fase de configuración y personalización y la fase de derivación.

Figura 1-2: Ciclo de vida de una línea de productos. Adaptada de Apel *et al.* [25].



La primera fase del ciclo de vida expuesto es el **análisis del dominio**. Ésta se da en el proceso de la ingeniería del dominio y desde la perspectiva del espacio del problema. Es en esta fase en la cual se define el diseño de la línea de productos completa incluyendo la definición de variabilidad de la misma [25]. En esta fase se realizan la ingeniería de requisitos del dominio, la definición de la arquitectura de referencia de la línea de productos y el modelado de la variabilidad. Éste último proceso típicamente da como resultado un modelo de variabilidad de la línea de productos [25], el cual se explica en la siguiente sección.

La segunda fase del ciclo de vida de una línea de productos es la **implementación del dominio**. Ésta se da en el proceso de la ingeniería del dominio y desde la perspectiva del espacio de la solución. Esta fase se caracteriza por la realización o implementación de los artefactos abstractos, los cuales fueron identificados en el proceso de análisis del dominio. Con el fin de lograr esto, uno de sus insumos es el modelo de variabilidad obtenido en el proceso de análisis del dominio [25]. En esta fase se realizan procesos como la ingeniería de requisitos de los componentes reutilizables del dominio, la definición de su arquitectura, su implementación, la realización de pruebas unitarias y el enlace de dichos componentes con las características del modelo de variabilidad definido previamente. En esta fase se obtiene como resultado una serie de artefactos que implementan las características del modelo de variabilidad y que pueden ser usados posteriormente en la derivación de productos de la línea de productos [25].

La tercera fase del ciclo de vida es la fase de **configuración y personalización**. Ésta se da en el proceso de la ingeniería de la aplicación y desde la perspectiva del espacio del problema. Esta fase comprende los procesos en los cuales los requisitos de un cliente particular son obtenidos, analizados y modelados, para finalmente ser usados en el proceso de configuración [25]. Éste proceso consiste en resolver los requisitos del nuevo producto con respecto al modelo de variabilidad y a los componentes implementados disponibles. En esta fase se obtienen y analizan los requisitos de una nueva aplicación, se define la arquitectura de la misma y se lleva a cabo, de ser necesario, la personalización de determinadas características. El resultado principal de este proceso es una configuración, la cual es una colección de componentes del dominio reutilizables, los cuales satisfacen los requisitos del cliente y de otros interesados, y las restricciones del dominio especificadas en el modelo de variabilidad [25].

Finalmente, la cuarta fase del ciclo de vida es la fase de **derivación**. Ésta se da en la ingeniería de la aplicación y desde la perspectiva del espacio de la solución. Esta fase tiene como resultado principal un producto individual construido y ensamblado [25]. Para ello, se usan los componentes reutilizables resultantes de la fase de implementación del dominio de acuerdo a las especificaciones resultantes de la fase de configuración y personalización [25]. Esta fase incluye procesos de requisitos, de definición de arquitectura y de implementación de la derivación. También incluye pruebas de integración [27], en las cuales los componentes se integran y se prueban como un sistema completo.

Adicionalmente a los procesos anteriores, existen otros que son transversales a todo el proceso de ingeniería de líneas de productos. Esto es, que se pueden llevar a cabo en todas las fases de la misma. Dos de ellos son los procesos de verificación y validación de los modelos de líneas de productos. En el proceso de verificación se buscan defectos en el modelo [28], apuntando a si el mismo está bien construido. En el proceso de validación se busca establecer si un producto, servicio o sistema (en este caso un modelo), cumple con los requisitos de los interesados [29].

1.1.3 Modelos de líneas de productos

Los **modelos de líneas de productos** son abstracciones que representan los requisitos del dominio de los productos [1]. Estos se construyen en el proceso de ingeniería del dominio y están situados en el espacio del problema. Estos modelos permiten representar la variabilidad de una línea de productos, así como sus elementos comunes. En los últimos años se propusieron diferentes formalismos o notaciones que permiten modelar la variabilidad de una línea de productos. Entre otros, se encuentran los modelos de características [30], los modelos *Orthogonal Variability Model* (OVM) [1] y los modelos de variabilidad basados en restricciones [31].

Un **modelo de características** (en inglés *Features Model*) representa las características estándar de un conjunto de productos y las relaciones entre éstas [30]. Éste permite representar las características comunes presentes en una línea de productos, así como los elementos particulares a productos específicos. Una **característica** es una parte, cualidad o rasgo prominente o distintivo de un producto o un sistema [32]. Este modelo se ha convertido en un estándar *de facto* dentro de la comunidad de las líneas de productos para el modelado de la variabilidad.

En la literatura se pueden encontrar varias notaciones usadas a la hora de elaborar un modelo de características. La notación **FODA** (*Feature-Oriented Domain Analysis*) [30], fue la primera en ser propuesta, permitiendo representar las características de un sistema y las relaciones entre éstas, así como su carácter opcional u obligatorio. También se propone el uso de cardinalidad en los modelos de características [33], del mismo modo que se hace en la notación UML. Por otro lado, se ha propuesto la inclusión de atributos dentro de las características; el uso de estos y de cardinalidades dio lugar a los **modelos de características extendidos** [33], permitiendo así una mayor expresividad.

Un modelo **OVM** (*Orthogonal Variability Model*) define la variabilidad de una línea de productos, permitiendo relacionar dicha variabilidad con otros artefactos de desarrollo, tales como modelos de casos de uso, modelos de diseño, modelos de componentes y modelos de pruebas [1]. En los modelos OVM, los **puntos de variación** describen lo que varía entre productos en una línea de productos. Por cada punto de variación, se define un conjunto de **variantes** [1]. Estos modelos incluyen además relaciones de dependencia obligatoria, opcional o alternativa, entre los puntos de variación y sus respectivas variantes.

Los modelos de variabilidad basados en restricciones [31] son representaciones gráficas o textuales de los elementos de un dominio y las diferentes relaciones de variabilidad entre esos elementos. La representación gráfica se puede hacer a través de grafos de restricciones (también conocidos como redes de restricciones) y la representación textual se puede hacer mediante un programa por restricciones. La gran ventaja de este lenguaje es que se pueden representar restricciones complejas entre los elementos del dominio y no solo las restricciones básicas de los modelos de características y los modelos OVM, sin depender de una estructura jerárquica u ortogonal como lo requieren, respectivamente, esos dos lenguajes.

Además de los anteriores modelos, existen otros formalismos, como los modelos orientados a decisiones (Dopler) [34], para modelar la variabilidad en las líneas de productos.

1.2 Medición

La medición es un proceso de gran importancia en la ciencia y la ingeniería. Su uso es intensivo en áreas de estudio maduras, lo que permite una evaluación efectiva de productos, procesos y experimentos [3][4]. Fenton y Pfleeger [35] definen **medición** como “el proceso por el cual números o símbolos son asignados a atributos de entidades en el mundo real de tal manera que los describan de acuerdo a reglas claramente definidas”. Este proceso también se puede ver como un “mapeo desde el mundo empírico (o real) al mundo formal (o matemático)” [35]. Esto se puede sintetizar en que el proceso de medición busca describir, dentro del mundo formal, un atributo de una entidad, la cual pertenece al mundo real. El número o símbolo asignado en dicho proceso es lo que se conoce como la **medida** [35].

1.2.1 Medición en la ingeniería de software

La medición tiene un rol cada vez más importante en la ingeniería de software. Ésta juega un papel clave en la evaluación de proyectos y productos y en la predicción de algunas variables como el costo y la calidad. También es la piedra angular de iniciativas como SW-CMM (Capability Maturity Model for Software), ISO/IEC 15504 (SPICE, Software Process Improvement and Capability dEtermination) y CMMI (Capability Maturity Model Integration) [4].

La IEEE [19] define **medición** como “el acto o proceso de asignar un número o categoría a una entidad para describir un atributo de esa entidad. Una figura, grado o cantidad obtenida midiendo”. Por otro lado, Ebert [36], enfocado explícitamente en la ingeniería de software, asevera que “las *mediciones* vinculan números a atributos de objetos de software en un modo que es exactamente definido, siendo así un proceso repetible y automatizable”. De las definiciones anteriores podemos concluir que la medición es un proceso mediante el cual se busca describir atributos (como modularidad o costo) de entidades del mundo real (para nuestro caso, piezas de software), asignándoles un número o símbolo siguiendo reglas claramente definidas. Estas reglas a su vez deberían permitir que el proceso de medición sea repetible y automatizable.

Por otro lado, al consultar la literatura, es posible concluir que no hay un consenso general a la hora de definir los conceptos de métrica y medida dentro del marco de la ingeniería de software. Si bien existen propuestas para un marco conceptual común

[18][37][4] y estándares relacionados con la medición [19][38][39], las diferencias terminológicas y conceptuales siguen a la orden del día. Por ejemplo, Montagud *et al.* [3] en su estudio, tratan los términos métrica y medición como sinónimos. El significado de ambos términos varía significativamente entre dos versiones del mismo glosario de la IEEE [19], [40]. Y finalmente, en el vocabulario internacional de metrología (VIM) [5] prescinden de los términos métrica y medida y en su lugar usan el término medición.

Así pues, una medida se puede definir como “una manera de determinar un valor comparándolo con una norma” o “aplicar una métrica” [19]. Wohlin *et al.* [41] la definen como “el número o símbolo asignado a una entidad para caracterizar un atributo”. Por su parte Fenton y PFleeger [35] dicen que “una medida es el número o símbolo asignado a una entidad por el mapeo hecho mediante medición a fin de caracterizar un atributo”.

Por otro lado, la IEEE define métrica como “una medida cuantitativa del grado en el que un sistema, componente o proceso posee un atributo dado” [40]. Sin embargo, en un trabajo posterior [19], la define como “una función cuyas entradas son datos de una pieza de software y cuya salida es un solo valor numérico que puede ser interpretado como el grado al que un software posee un atributo dado que afecta su calidad”. Wohlin *et al.* [41] expresan que “la palabra métrica es usada para denotar una entidad que es medida, por ejemplo, líneas de código (LOC por sus siglas en inglés) es una métrica de producto”. Finalmente Ebert [36] la definen como “Un criterio para determinar la diferencia o distancia entre dos entidades”.

Es evidente la diferencia que se observa en las definiciones de medida y métrica. Es por eso que en este trabajo se opta por diferenciar claramente ambos conceptos. Así, de acuerdo a las definiciones anteriores, para el presente trabajo se define **medida** como el número o símbolo asignado en el proceso de medición. Por su parte, **métrica** se define como una función con entradas y una salida definidas mediante la cual se asigna un valor (medida) que describe un atributo de una entidad dada.

Después de dilucidar los conceptos anteriores, conviene definir los conceptos conexos. Un **atributo** es una propiedad medible, física o abstracta, de una entidad [19]. Por su parte, una **entidad** se define como un objeto o un evento en el mundo real [35], en contraposición al mundo formal o matemático. En el caso de la ingeniería de software, una entidad puede ser un sistema de software o un componente del mismo y un atributo puede ser la mantenibilidad, el costo de desarrollo o la complejidad estructural.

En la ingeniería de software, una entidad puede ser de uno de tres tipos: proceso, producto o recursos [41]. El **proceso**, describe las actividades que se llevan a cabo en el desarrollo del software. El **producto** pueden ser documentos, entregables, artefactos o componentes resultantes del proceso de desarrollo. Finalmente, los **recursos** son los objetos o insumos necesarios para ejecutar el proceso, tales como software, hardware o personal [41].

La medida tomada en un proceso de medición puede ser de dos tipos: directa o indirecta [41]. Una medida **directa** de un atributo es aquella que se puede obtener directamente, y que no requiere o se relaciona con la medición de otros atributos [35]. Por ejemplo, la métrica *lines of code* (LOC) se obtiene mediante una medición directa del código fuente. Por otro lado, una medida **indirecta** está relacionada con la medición de otros atributos, y por lo general, se deriva de la medición de estos [35]. Por ejemplo, una métrica de densidad de defectos es una relación entre el tamaño de una pieza de software y el número de defectos encontrados en esta, siendo las dos últimas a su vez medidas de dos atributos distintos. La medida también puede ser subjetiva u objetiva. Una medida **subjetiva** es aquella en la que hay un juicio o criterio por parte del sujeto que la hace que influye en su resultado [35]. Por otro lado, en una medida **objetiva** no existe influencia de ningún tipo de juicio por parte del sujeto y por el contrario depende completamente de la entidad y el proceso de medición [35].

Al realizar un proceso de medición, se debe tener en cuenta la escala. La **escala** es el modo en el que se toma la medida para caracterizar un atributo, formalmente, es el modo en el que se hace el mapeo del atributo desde la entidad medida (mundo real) al mundo formal o matemático [35]. Ésta puede ser de uno de los siguientes tipos [35]:

- **Nominal**, es decir, que mapea el atributo de una entidad a un nombre o símbolo predefinido sin que este tenga una magnitud asociada (p.e. los colores).
- **Ordinal**, que clasifica las entidades de acuerdo a un criterio de ordenamiento sin que haya un valor de magnitud significativo asociado a cada clase (p.e. frío, tibio y caliente).
- **Intervalo**, usada cuando la diferencia entre dos medidas es significativa, mas no su valor ni la proporción entre dos valores dentro de la escala (p.e. grados Fahrenheit). Las escalas de este tipo admiten operaciones de suma y resta de medidas, mas no de multiplicación o división.

- **Ratio**, que es cuando existe un valor cero, es decir, que es posible la ausencia del atributo medido, y la proporción entre dos escalas es significativa (p.e. unidades de longitud). Las escalas de este tipo admiten todo tipo de operaciones aritméticas sobre ellas.
- **Absoluta**, que es un caso especial del tipo *ratio*, en el cual se mide mediante el conteo de elementos en un conjunto de entidades, esto implica que el valor en sí de la medida es la única transformación significativa (p.e. grados Kelvin) [35].

En el proceso de medición es conveniente el uso de un modelo que represente la entidad medida [42]. Dentro de este contexto, un **modelo** es una representación abstracta de la entidad que facilita su medición. Éste permite definir una métrica que caracterice efectivamente un atributo de la entidad, independientemente del significado intuitivo (y a veces ambiguo) que pueda tener ésta [18].

1.2.2 Medición en la ingeniería de líneas de productos

La medición es un proceso de gran importancia en la ingeniería de líneas de productos [3]. Éste permite el control, monitoreo, entendimiento y predicción [4] de diferentes atributos de una línea de productos. El control de estos atributos es muy importante en este paradigma, incluso más que en la ingeniería de productos tradicional, ya que un diseño inadecuado o un defecto en el diseño de la línea de productos, tiene el potencial de propagarse a una gran cantidad de productos en la línea [1].

En una línea de productos se pueden medir atributos como la complejidad, el coeficiente de variabilidad o la extensibilidad. La complejidad está determinada por el número de variables, relaciones y restricciones entre variables en una línea de productos. El coeficiente de variabilidad es el grado en el cual la línea de productos presenta características variables en contraposición a las características comunes. Finalmente, la extensibilidad es el grado en el cual es posible extender la funcionalidad o la estructura de una línea de productos. Para medir atributos como los anteriores se puede usar modelos como el modelo de características, el *ortogonal variability model*, el modelo de componentes, entre otros.

En el próximo capítulo del presente trabajo, se hace una caracterización del proceso de medición en la ingeniería de líneas de productos. Esto incluye los atributos medidos, los

modelos usados, la definición de métricas, entre otros aspectos. Posteriormente, se propone un *framework* para la medición en ingeniería de líneas de productos, lo que facilita la definición, aplicación y validación de métricas dentro de este marco.

2. Estudio de la literatura sobre la medición en líneas de productos: un mapeo sistemático

En este capítulo se presenta una caracterización detallada de los aspectos relacionados con la medición en la Ingeniería de Líneas de Productos (ILP). Esta caracterización busca ampliar el marco conceptual de este tópico. Además provee el contexto y sienta la base de la solución propuesta en la presente tesis. El enfoque usado fue la elaboración de un *systematic mapping study*, cuya metodología detallamos a continuación.

2.1 Método de investigación

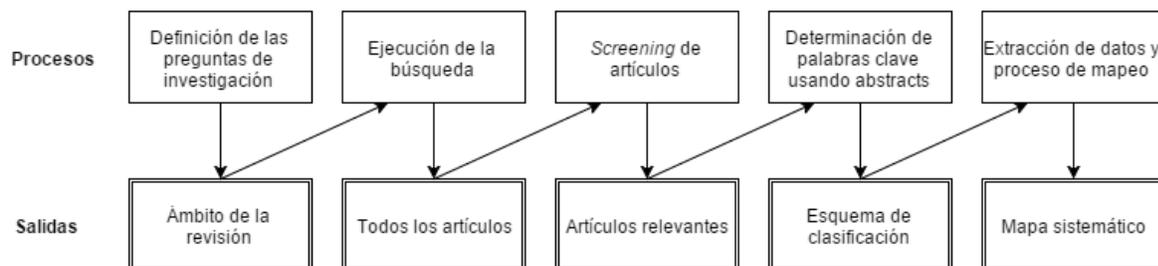
Las revisiones de literatura o estudios secundarios ocupan un lugar clave en la investigación científica. Ya sea para elaborar un *state of the art*, registrar los antecedentes de una investigación o buscar evidencia experimental de una hipótesis, entre otros. Dentro de las metodologías para efectuar estudios secundarios encontramos el *systematic literature review* y el *systematic mapping study*.

Un *systematic literature review* (SLR) es un estudio secundario (es decir, estudio basado en el análisis de investigaciones previas) utilizado para encontrar, evaluar críticamente y categorizar todos los artículos de investigación relevantes (estudios primarios) respecto a una pregunta de investigación o tema de investigación específicos [15]. Por su parte, un *systematic mapping study* (SMS) usa la misma metodología básica de un SLR, pero tiene como objetivo identificar y clasificar toda la información relacionada con un tema de investigación amplio, en lugar de responder a preguntas sobre los méritos relativos de hipótesis enfrentadas como lo hace un SLR [14]. La principal diferencia entre ambas metodologías es que mientras el SLR se enfoca en una o pocas preguntas de investigación buscando evaluar una hipótesis específica, el SMS se enfoca en un tema investigativo más amplio, respondiendo a más preguntas de investigación y buscando

una caracterización más genérica del tópico. En el presente capítulo se muestran el proceso y los resultados de una caracterización de la medición en la ingeniería de líneas de productos. Para esto se efectuó un *systematic mapping study*, en el cual se siguió un protocolo que detalla los pasos a seguir durante la ejecución del estudio.

El proceso que se lleva a cabo en un SMS se muestra en la Figura 2-1. Éste tiene las siguientes etapas: (1) definición de las preguntas de investigación, (2) ejecución de la búsqueda, (3) selección rigurosa de los artículos (*screening*), (4) determinación de las palabras clave usando *abstracts*, y (5) la extracción de datos y el proceso de mapeo. Cada etapa produce unas salidas, las cuales se usan en la etapa siguiente. El resultado final es un mapa sistemático del tópico estudiado.

Figura 2-1: Proceso de ejecución de un *systematic mapping study*. Traducido del trabajo de Petersen *et al.* [14].



2.1.1 Caracterización propuesta

Con el propósito de dilucidar el alcance y los objetivos de nuestro estudio, proponemos el *framework* representado en la Figura 2-2. Su construcción está inspirada en el *framework* conceptual presentado por Souag *et al.* [43]. Esta caracterización está estructurada alrededor de seis facetas. El protocolo abarca algunas de las dimensiones clave que caracterizan las métricas y su rol en la ingeniería de líneas de productos.

F₁. Atributo medido. Esta faceta presenta el atributo medido mediante una métrica dada (p.e., mantenibilidad y costo de reutilización, entre otros). Muestra también en qué ámbito se mide dicho atributo. Fenton & Pfleeger [35] enuncian los ámbitos en los que se puede llevar a cabo la medición; entre otros, tenemos la estimación de costo o de esfuerzo, la medición de la productividad, la validación de la calidad o la medición de la complejidad.

F₂. Definición de la métrica. La segunda faceta trata de cómo la métrica es definida. Esta definición comprende las siguientes dimensiones:

- Cómo la métrica mide un atributo específico. La medición puede ser, como se definió en la Sección 1.2.1, directa o indirecta, así como objetiva o subjetiva.
- La notación de modelado usada para hacer la medición. Dicha notación puede ser *Unified Model Language* (UML), *Feature-Oriented Domain Analysis* (FODA), *Orthogonal Variability Model* (OVM), entre otras.
- La escala y el tipo de escala usados en la medida. El tipo de escala puede ser: nominal, ordinal, intervalo, ratio y absoluta.

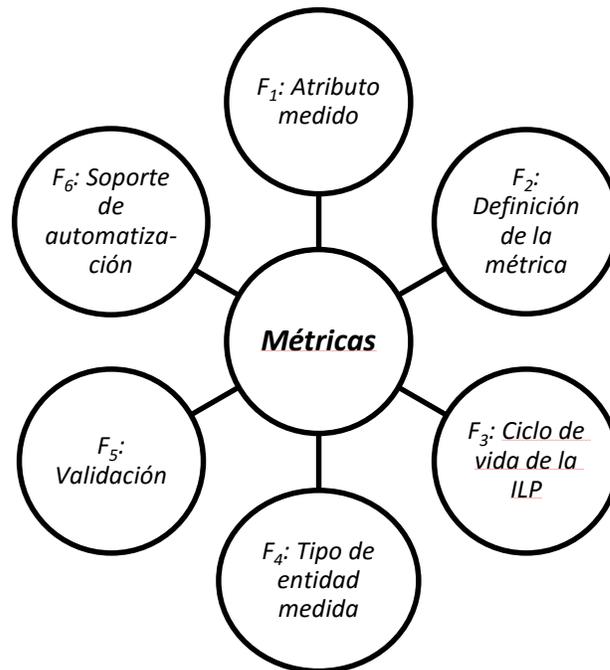
F₃. Ciclo de vida de la ILP. Con esta faceta nuestro objetivo es determinar en qué etapa del ciclo de vida se usa la métrica. Una métrica puede medir atributos asociados a la ingeniería de dominio o a la ingeniería de aplicaciones. También puede estar ubicada en el espacio del problema o en el espacio de la solución. La intersección de los anteriores aspectos dan lugar a cuatro fases: análisis del dominio, implementación del dominio, configuración y personalización, y derivación (Figura 1-2).

F₄. Tipo de entidad medida. Esta faceta trata con el tipo de la entidad medida por una métrica dada. Ésta puede ser de uno de tres tipos: proceso, producto, o recursos.

F₅. Validación. Una forma de evaluar la madurez de un enfoque es evaluar sus procedimientos de validación. Éste es un aspecto clave a analizar, dado que es muy común encontrar métricas sin ningún tipo de validación [3], lo que pone en duda su validez y aplicabilidad. Esta faceta trata sobre si una métrica fue validada. Una métrica puede contar con validación teórica o validación empírica [44]. Adicionalmente, es útil saber si la validación empírica fue llevada a cabo mediante un caso de estudio, una encuesta, un experimento controlado, o si por el contrario, no hubo ninguna validación empírica [3].

F₆. Soporte de automatización. Esta faceta, concierne con la posibilidad de automatización de la medición en la ILP. La medición puede hacerse usando razonamiento automatizado, la cual consiste en la extracción de datos, a partir de modelos de variabilidad, de una forma automatizada [45].

Figura 2-2: *Framework* propuesto para la caracterización de los artículos. Fuente: Elaboración propia.



2.1.2 Objetivos

El principal objetivo del presente SMS es clasificar y analizar los trabajos de investigación relacionados con la medición en la ILP encontrados en la literatura. Esto incluye la información de publicación, los enfoques estudiados y las brechas de investigación existentes. Éste se divide en los siguientes objetivos secundarios:

G1: Obtener la información de publicación de estudios sobre métricas en la ingeniería de líneas de productos.

G2: Identificar y caracterizar las métricas usadas y los atributos medidos en las líneas de productos.

G3: Evaluar la aplicabilidad de tales métricas en las líneas de productos, analizando el proceso de validación y la posibilidad de automatización de las métricas.

G4: Identificar las brechas de investigación en la medición en la ingeniería de líneas de productos.

2.1.3 Preguntas de investigación

Con el propósito de alcanzar los objetivos mencionados anteriormente, definimos trece preguntas de investigación, las cuales enumeramos a continuación:

- RQ1. ¿Cuál es la distribución de tiempo de los estudios primarios encontrados?
- RQ2. ¿En qué publicaciones y sitios de investigación se publicaron los estudios?
- RQ3. ¿Cuál es la distribución geográfica de los estudios primarios y quiénes son sus autores?
- RQ4. ¿Cuál es el tipo de investigación [46] efectuado para cada uno de los artículos seleccionados?
- RQ5. ¿Cuáles son los atributos que se miden en la ILP?
- RQ6. ¿Qué métricas se estudian en la ILP?
- RQ7. ¿Qué modelos se usan en las métricas encontradas?
- RQ8. ¿Cómo están definidas las métricas?
- RQ9. ¿En qué etapa del ciclo de vida de la línea de productos se usa la métrica?
- RQ10. ¿Cuál es el tipo de la entidad medida por una métrica dada?
- RQ11. ¿Las métricas encontradas en la literatura están validadas apropiadamente?
- RQ12. ¿Los estudios encontrados en la literatura soportan la automatización de la medición?
- RQ13. ¿Alguna faceta del *framework* propuesto presenta una brecha de investigación?

2.1.4 Conducción del estudio

Con el objetivo de diseñar y ejecutar una estrategia de búsqueda efectiva, se aplicó una adaptación del enfoque de Zhang *et al.* [47]. Si bien esta propuesta se enfoca en los SLRs, también se puede aplicar en un SMS. Esta estrategia de búsqueda incluye una búsqueda manual y una búsqueda automática, así como un proceso de *snowballing*. El *snowballing* se usó para encontrar estudios relevantes adicionales, ampliando la cobertura de la búsqueda. El proceso consiste en usar la lista de referencias de un artículo o de citas hacia éste para identificar estudios adicionales sobre el tema [48].

A fin de caracterizar apropiadamente los estudios acerca de métricas y atributos en ILP, se llevó a cabo una selección cuidadosa de los artículos a analizar. Para ello, se usó el siguiente conjunto de criterios de inclusión y exclusión para seleccionar los artículos que están dentro del alcance del estudio:

Criterios de inclusión

1. Trabajos (artículos o capítulos de libro) que presentan y explican métricas en la ILP.
2. Trabajos acerca de la medición de atributos en la ILP.
3. Trabajos publicados entre Enero 1 de 1990 y Marzo 31 de 2015.

Criterios de exclusión

1. Reportes técnicos que representan lecciones aprendidas, *white papers*, estudios que describen eventos, *posters* o trabajos no publicados.
2. Trabajos de opinión o *position papers*.
3. Trabajos que no explican el uso de las métricas propuestas.
4. Estudios acerca de métricas en la ingeniería de software pero no aplicables a la ILP.
5. Trabajos escritos en idiomas diferentes al inglés.

Para seleccionar los artículos relevantes, se siguió el proceso de *screening* de artículos descrito a continuación:

1. Se ejecutó una búsqueda manual, usando los sitios de publicación listados en las Tablas 2-1, 2-2 y 2-3. La búsqueda manual también es útil para refinar las cadenas de búsqueda usadas en la búsqueda automática.
2. Se ejecutó la búsqueda automática. Ésta se hace usando los motores de búsqueda listados en la Sección 2.1.6.
3. Finalmente se ejecutó el proceso de *snowballing*.

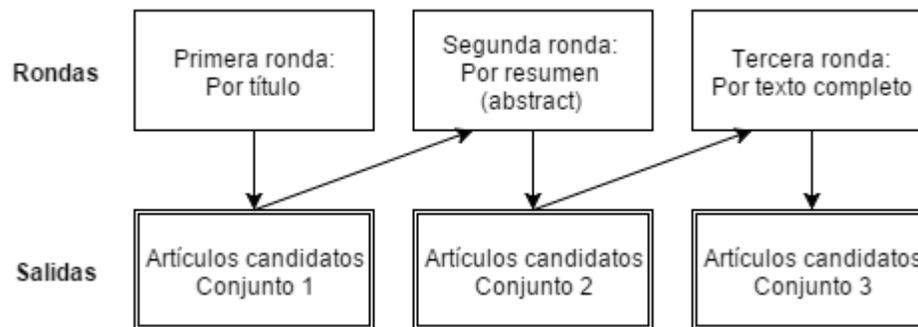
Dentro de cada uno de los pasos del proceso de *screening*, se distinguen tres rondas:

Ronda 1: Se seleccionan los trabajos de acuerdo a su título y palabras clave, usando solo los criterios de inclusión enumerados previamente.

Ronda 2: Considerando los trabajos seleccionados en la primera ronda, se analiza el resumen (*abstract*) y se seleccionan aquellos que cumplan con los criterios de inclusión y exclusión.

Ronda 3: Se consideran los trabajos seleccionados en la segunda ronda, se analiza el texto completo y se seleccionan aquellos que cumplan con los criterios de inclusión y exclusión.

Figura 2-3: Proceso de *screening* (Adaptado de Petersen *et al.* [14]).



Un trabajo duplicado es aquel que es recuperado desde varias fuentes de búsqueda (p.e., bibliotecas digitales y sitios de publicación), por lo que se cuenta con más de una copia del mismo. El conjunto final de estudios relevantes no debe incluir todas las copias del trabajo duplicado [15]. En consecuencia, los trabajos duplicados son purgados, y las copias adicionales son excluidas en la primera ronda.

Por otro lado, los estudios repetidos son artículos o capítulos de libro acerca del mismo estudio que son publicados en varios sitios de publicación. Los estudios repetidos encontrados en el proceso de búsqueda son almacenados aparte después de la segunda ronda. En la tercera ronda, de los estudios repetidos se selecciona el más completo o el más reciente.

Los estudios secundarios, como otros *systematic literatura review* u otros *systematic mapping study*, no son incluidos entre los artículos relevantes. Sin embargo, estos son utilizados posteriormente para validar el proceso de búsqueda. Adicionalmente, los estudios secundarios son usados en la sección de los trabajos relacionados del reporte final del SMS.

2.1.5 Búsqueda manual

Antes de hacer una búsqueda automática, se debe hacer una búsqueda manual [15]. La búsqueda manual se hace para identificar estudios relevantes. Este proceso consiste en una exploración manual en los tipos de publicaciones más relevantes en el área del estudio. A continuación se presentan los *journals*, *conferencias* y *workshops* consultados en la búsqueda manual, así como sus respectivas bibliotecas digitales, en las cuales se puede acceder al texto completo de los trabajos.

Journals

Se seleccionaron los *journals* para este estudio considerando los más usados en estudios secundarios similares [3][49][50][44]. Estos se listan en la Tabla 2-1.

Tabla 2-1: Lista de *journals* consultados en la búsqueda manual.

<i>Journal</i>	<i>Biblioteca Digital</i>	<i>Factor de Impacto</i>
TSE – IEEE Transactions on Software Engineering	IEEE Xplore	2.292
INT J ADV MANUF TECHNOLOG – International Journal of Advanced Manufacturing Technology	Springer	1.779
TOSEM – ACM Transactions on Software Engineering and Methodology	ACM DL	1.472
J PROD INNOVAT MANAGE – Journal of Product Innovation Management	Wiley Online Library	1.379
INFOSOF – Information & Software Technology	ScienceDirect	1.328
JSS - Journal of Systems and Software	ScienceDirect	1.245
SOFTWARE – IEEE Software	IEEE Xplore	1.230
SCP - Science of Computer Programming	ScienceDirect	0.548

Conferencias y *workshops*

Se seleccionaron conferencias y *workshops* para el presente estudio siguiendo dos criterios. El primer criterio fue su uso en estudios secundarios similares [3][49][50][44]. El segundo fue el consejo de expertos. Las conferencias y *workshops* seleccionados se muestran en la Tabla 2-2 y en la Tabla 2-3.

Tabla 2-2: Lista de conferencias consultadas en la búsqueda manual.

<i>Conferencia</i>	<i>Biblioteca Digital</i>
AOSD – Aspect-Oriented Software Development	ACM DL
ASE - Automated Software Engineering	IEEE Xplore
CAiSE - Conference on Advanced Information Systems Engineering	Springer
CBSE - Component-Based Software Engineering	Springer
CIbSE - Conferencia Iberoamericana de Software Engineering	N/A
COEA - Component-Oriented Enterprise Applications	EMIS
Component-Based Software Quality	Springer
COMPSAC - Computer Software and Applications Conference	IEEE Xplore
ECSA - European Conference on Software Architecture	Springer

ENASE - Evaluation of Novel Approaches to Software Engineering	IEEE Xplore
ESEC - European Software Engineering Conference	ACM DL
ESEM - Empirical Software Engineering and Measurement	ACM DL
ICSE - International Conference on Software Engineering	IEEE Xplore
ICSEA - International Conference on Software Engineering Advances	IEEE Xplore
ICSR - International Conference on Software Reuse	Springer
ISESE - International Symposium on Empirical Software Engineering	ACM DL
MENSURA – International Conference on Software Process and Product Measurement	IEEE Xplore
METRICS - IEEE International Software Metrics Symposium	IEEE Xplore
QoSA – Quality of Software Architectures	ACM DL
QSIC - Conference on Quality Software	IEEE Xplore
RE - Requirements Engineering	IEEE Xplore
REFSQ - Requirements Engineering: Foundation for Software Quality	IEEE Xplore
SafeConfig - Symposium on Configuration Analytics and Automation	IEEE Xplore
SCM - System Configuration Management	Springer
SPLC - Software Product Lines	ACM DL
SSR - Symposium on Software Reusability	ACM DL

Tabla 2-3: Lista de *workshops* consultados en la búsqueda manual.

<i>Workshop</i>	<i>Biblioteca Digital</i>
DE@ER - Domain Engineering	Springer
IW-SAPF - International Workshop on Software Architectures for Product Families	Springer
PFE - Software Product Family Engineering	Springer
VaMoS – Int. Workshop on Variability Modelling on Software-Intensive Systems	ACM DL

2.1.6 Búsqueda automática

Una búsqueda automática consiste en usar bibliotecas digitales y motores de búsqueda para obtener resultados relevantes. Esto se logra usando cadenas de búsqueda adaptadas a la sintaxis de búsqueda de cada motor o biblioteca. La búsqueda automática puede ser más efectiva que la búsqueda manual, pero la calidad de sus resultados depende de la calidad de las cadenas de búsqueda, de la capacidad de los motores de búsqueda y de la amplitud del campo de investigación.

Para llevar a cabo una búsqueda automática se usaron bibliotecas digitales y un índice, el cual recoge trabajos de múltiples bibliotecas digitales. Estas fuentes proveen un gran repositorio de artículos de varios sitios de publicación. Se seleccionaron dos bibliotecas digitales: *Scopus* y *Web of Science*. *Scopus* es una herramienta muy útil, ya que indexa una gran cantidad de bibliotecas digitales, como *Elsevier*, *IEEE*, *Springer*, *Wiley-*

Blackwell, entre otras¹. *Web of Science* es también una herramienta muy útil, incluyendo bibliotecas como *Inspec*. Se seleccionaron también *Google Scholar* para complementar los resultados obtenidos mediante bibliotecas digitales.

Para el presente estudio se definió solo una cadena de búsqueda. Esto con el fin de examinar cada una de las facetas del *framework* en cada artículo encontrado. Así, el *framework* se ve reflejado primordialmente a los formularios de extracción de datos en lugar de a múltiples cadenas de búsqueda. La cadena de búsqueda usada fue la siguiente:

("product line*" OR "product famil*" OR variability OR "product platform*") AND (metric* OR measur* OR estimat* OR evaluat* OR assess* OR indicat*) AND (attribute* OR propert* OR criteri* OR characteristic*)

La anterior cadena de búsqueda se definió con base en revisiones de literatura similares [3][44], tratando de cubrir todo el área de estudio de las métricas en la ingeniería de líneas de productos y su relación con atributos, propiedades o características de las líneas de productos.

2.1.7 Extracción de datos

En la extracción de datos, se usó una tabla de Microsoft Excel para reunir la información asociada a cada pregunta de investigación y a cada faceta del *framework*.

1. ID
2. Nombre (del artículo)
3. Autores
4. Año
5. País
6. Tipo de publicación
7. Nombre de la publicación²
8. Sitio de publicación
9. Tipo de investigación³

¹ Contenido de Scopus: <http://www.elsevier.com/solutions/scopus/content>

² Una publicación se efectúa en un *journal*, una conferencia o un capítulo de libro.

10. Atributo medido
11. Nombre de la métrica
12. Ámbito de la medición
13. Definición de la métrica
14. Tipo de medida (directa / indirecta)
15. Tipo de medida (objetiva / subjetiva)
16. Escala
17. Tipo de escala⁴
18. Notación de modelado usada
19. Etapa en el ciclo de vida de la LP
20. Tipo de entidad medida
21. Tipo de línea de producto
22. Validación teórica (si / no)
23. Tipo de validación empírica⁵
24. Soporte de automatización (si / no)

2.2 Resultados

En la presente sección se muestran los resultados obtenidos tras la conducción del *systematic mapping study*. Después de llevar a cabo las búsquedas manual y automática de artículos, y de ejecutar la primera ronda de *screening* (selección por título), fueron seleccionados 145 artículos. Después de la segunda ronda de *screening* (selección por abstract), fueron seleccionados 81 artículos. Finalmente, tras la tercera ronda de *screening* (selección por texto completo), se obtuvo una lista final de 62 artículos relevantes, en los cuales se proponen o estudian a fondo 282 métricas distintas. Los artículos se listan en el anexo A, así como los datos recolectados para cada uno. A continuación, se responden cada una de las preguntas de investigación planteadas para

³ De acuerdo a Wieringa *et al.* [46] un estudio puede ser una investigación de validación, una investigación de evaluación, una propuesta de solución, un artículo filosófico, un artículo de opinión o un artículo de experiencia.

⁴ El tipo de escala puede ser: nominal, ordinal, intervalo, ratio o absoluta [35].

⁵ La validación empírica puede efectuarse mediante casos de estudio, encuestas, experimentos controlados, o sin validación.

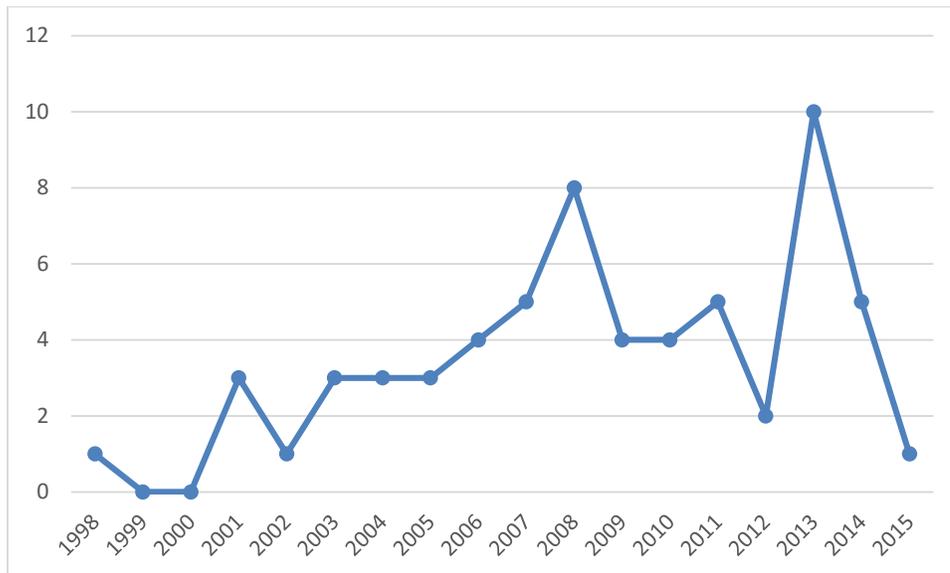
el SMS. El primer conjunto de preguntas da una mirada a las publicaciones existentes en el área de estudio, mientras el segundo conjunto muestra un panorama de la medición en la ILP.

2.2.1 Publicaciones en el área de estudio

RQ1. ¿Cuál es la distribución de tiempo de los estudios primarios encontrados?

El número de estudios encontrados en la literatura muestran una tendencia claramente creciente entre 1998 y 2008 (Figura 2-4). Después de este año la tendencia es irregular; sin embargo, 2013 fue el año con más publicaciones sobre la medición en la ILP. La baja entre enero de 2014 y marzo de 2015 (fecha límite del estudio) se debe en buena parte al tiempo que hay entre la ejecución de un estudio y su disponibilidad en bases de datos. Todo esto permite concluir que la medición en la ILP es un campo que ha crecido a lo largo de los años y que se mantiene vigente.

Figura 2-4: Distribución temporal de los artículos.



RQ2. ¿En qué publicaciones y sitios de publicación se publicaron los estudios?

La Figura 2-5 presenta la distribución de los estudios según el sitio de publicación. La tercera parte de los estudios en el área se encuentra en IEEEExplore (33.8%). Otras bibliotecas digitales importantes son Springer (21%), ScienceDirect (14.5%) y ACM DL (13%). Por otra parte, la mitad de los estudios (50%) se publican en conferencias,

mientras que un 42% se publican en revistas científicas (*journals*) y un 8% constituyen capítulos de libro (Figura 2-6).

Las revistas científicas en las que más se publican estudios en el área son *Information and Software Technology* con 4 artículos, el *Journal of Systems and Software* y el *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* con 2 artículos (Figura 2-7). Por su parte, las conferencias más prolíficas en artículos sobre el tema fueron *SPLC* y *VaMoS* (con 3 artículos cada una) (Figura 2-8). Finalmente, solo se encuentran 4 libros con propuestas de métricas en ILP (Figura 2-9), de estos solo en el libro *Software Product-Family Engineering* se encuentra más de un capítulo abordando este tema. En general, se pudo evidenciar que la publicación de artículos con estudios sobre métricas en ILP es muy fragmentada. Es decir, los estudios en el tema no se concentran en una o pocas publicaciones, sino que por el contrario, suelen encontrarse en una gran variedad de revistas científicas y conferencias.

Figura 2-5: Sitios de publicación.

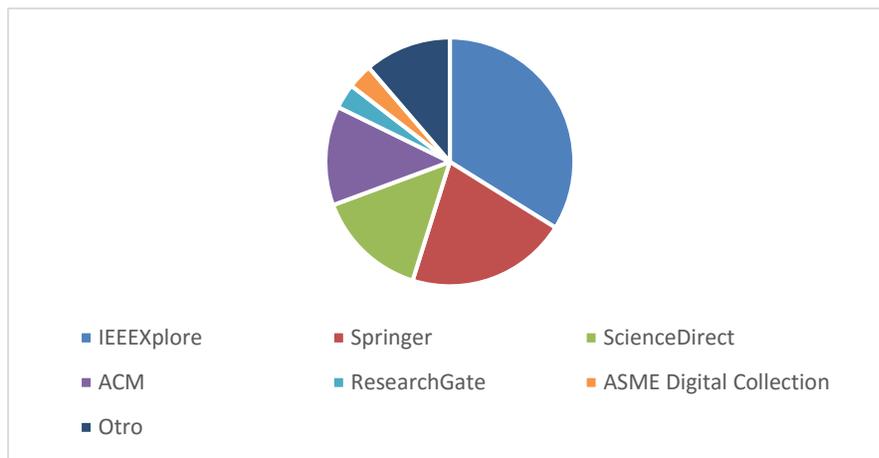


Figura 2-6: Artículos por tipo de publicación.

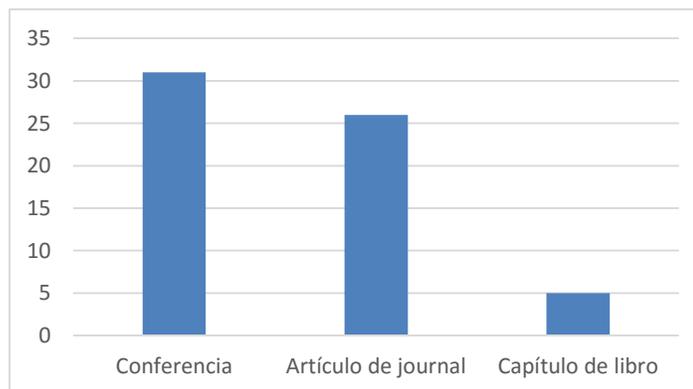


Figura 2-7: Principales revistas científicas sobre medición en ILP.

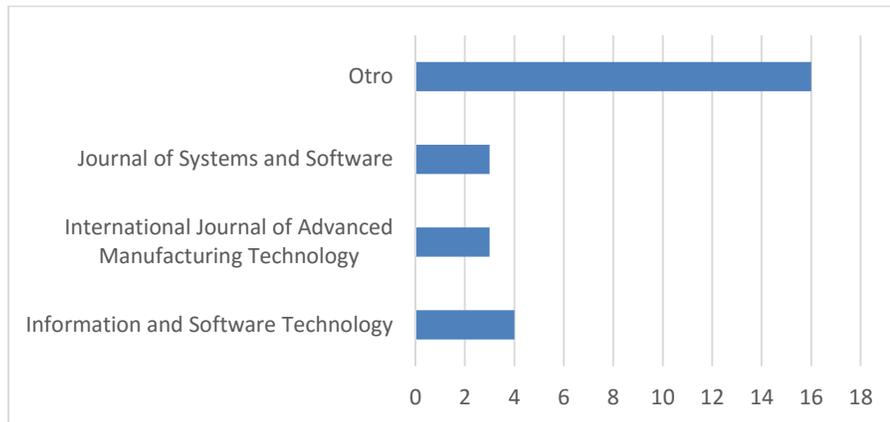


Figura 2-8: Principales conferencias sobre medición en ILP.

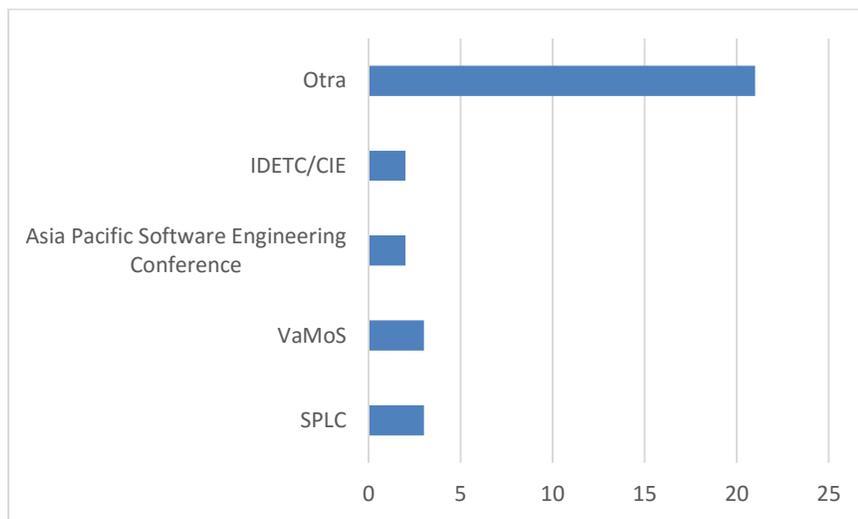
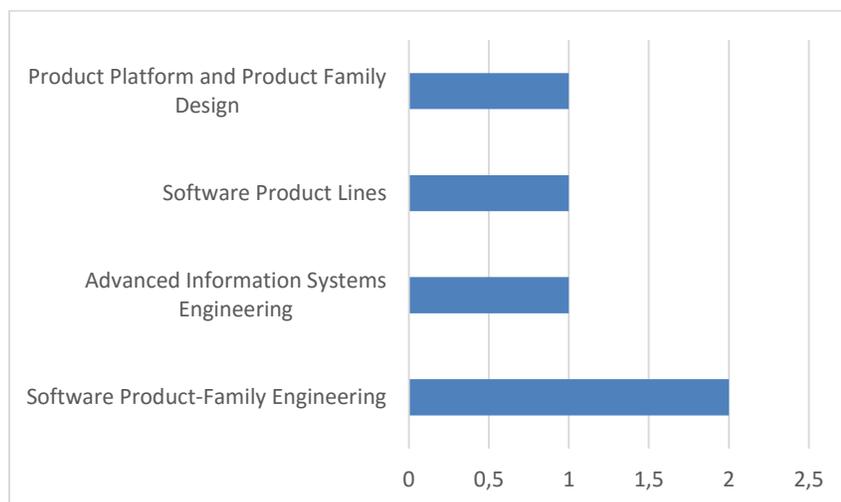


Figura 2-9: Libros con más estudios sobre medición en ILP.



RQ3. ¿Cuál es la distribución geográfica de los estudios primarios y quiénes son sus autores?

En esta caracterización, se tomó como país del estudio aquel donde se emplaza el laboratorio o institución donde labora el investigador principal. El país donde se dieron más estudios sobre métricas en ILP fue Estados Unidos, con un 22.6% de los registros, seguido de Alemania, con un 16%. Aparte de estos dos países, en general la publicación de estudios en el área es relativamente fragmentada, siendo predominantemente europea, aunque no necesariamente concentrándose en dicho continente (Figura 2-10).

Por el lado de los autores, Sven Apel y Norbert Siegmund son los que más figuran en los artículos revisados, siendo a su vez este último, autor principal en la mayor parte de aquellos artículos donde figura (Figuras 2-11 y 2-12).

Figura 2-10: Número de estudios (eje y) por país (eje x).

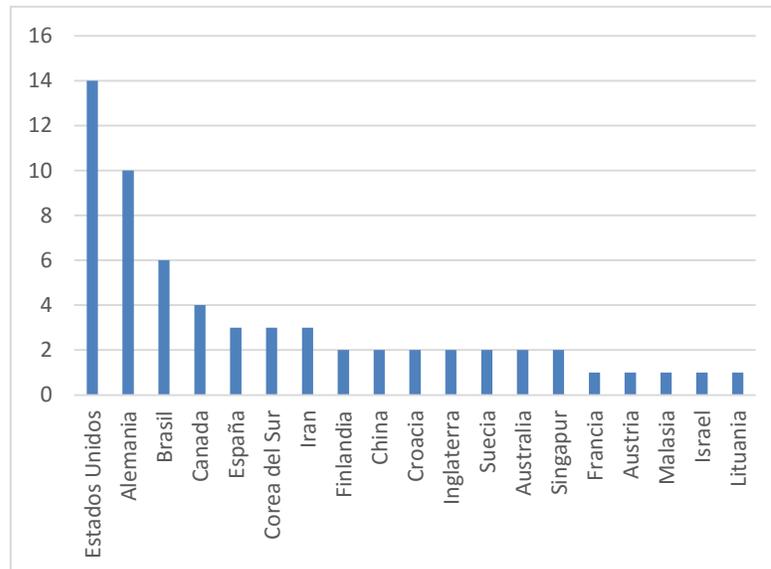


Figura 2-11: Participantes en estudios sobre medición en ILP.

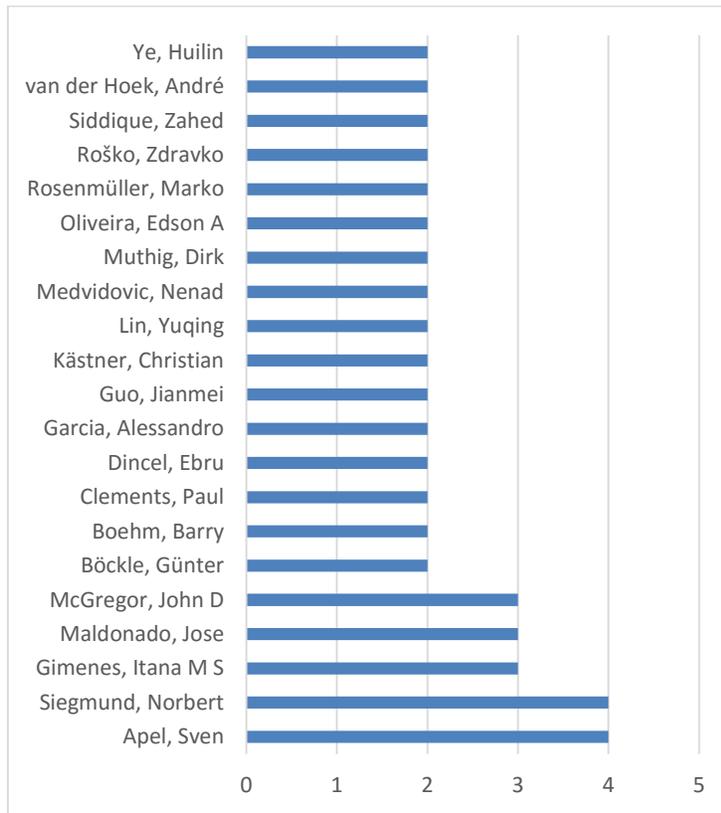
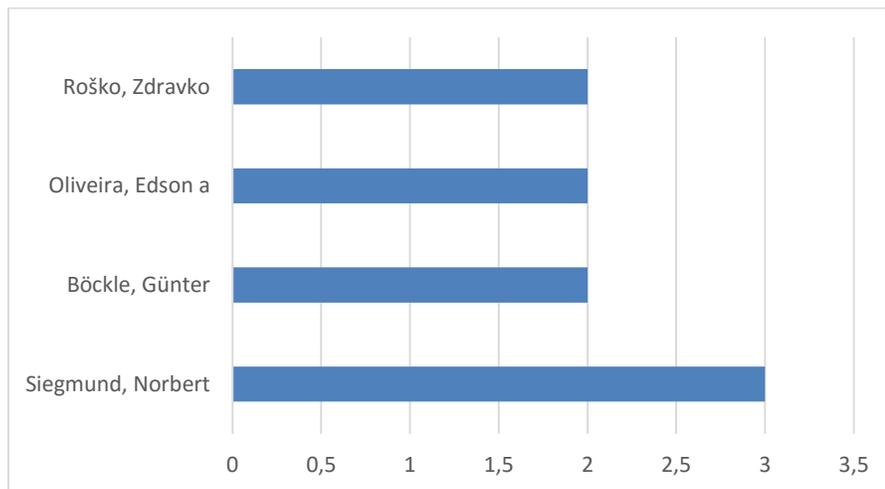


Figura 2-12: Principales autores (eje y) de estudios (eje x) sobre medición en ILP



RQ4. ¿Cuál es el tipo de investigación [46] efectuado para cada uno de los artículos seleccionados?

La mayor parte de los estudios encontrados, son del tipo *solution proposal*, específicamente, proponen una o varias métricas, o un método de evaluación o de

predicción, pero no necesariamente lo validan o lo prueban. Los estudios netamente empíricos son pocos o inexistentes dependiendo de su profundidad (Figura 2-13). Esto por sí solo no indica que las métricas no se estén validando apropiadamente, sin embargo como se verá más adelante, puede ser un indicio que lleve a esta conclusión.

Figura 2-13: Clase de investigación de los estudios.



2.2.2 Medición en la ingeniería de líneas de productos

RQ5. ¿Cuáles son los atributos que se miden en la ILP?

En la ILP se miden una gran cantidad de atributos. Si bien algunos de estos dependen del tipo de línea de productos que se modela, se pueden asociar a las líneas de productos en general, tanto de software como de manufactura. El atributo que más se mide es la variabilidad (*Variability*), con 45 de las 282 métricas encontradas, seguido de la complejidad (*Complexity*) con 39 métricas y *Commonality* con 17 (Figura 2-14). Esto y los datos observados en la Figura 2-15 denotan que en la medición en la ILP priman las métricas estructurales (62.4%). En muchos casos, los atributos medidos no están asociados a ningún *framework* o marco conceptual, mientras que en otros, el *framework* de medición se propone en el mismo trabajo donde se proponen las métricas.

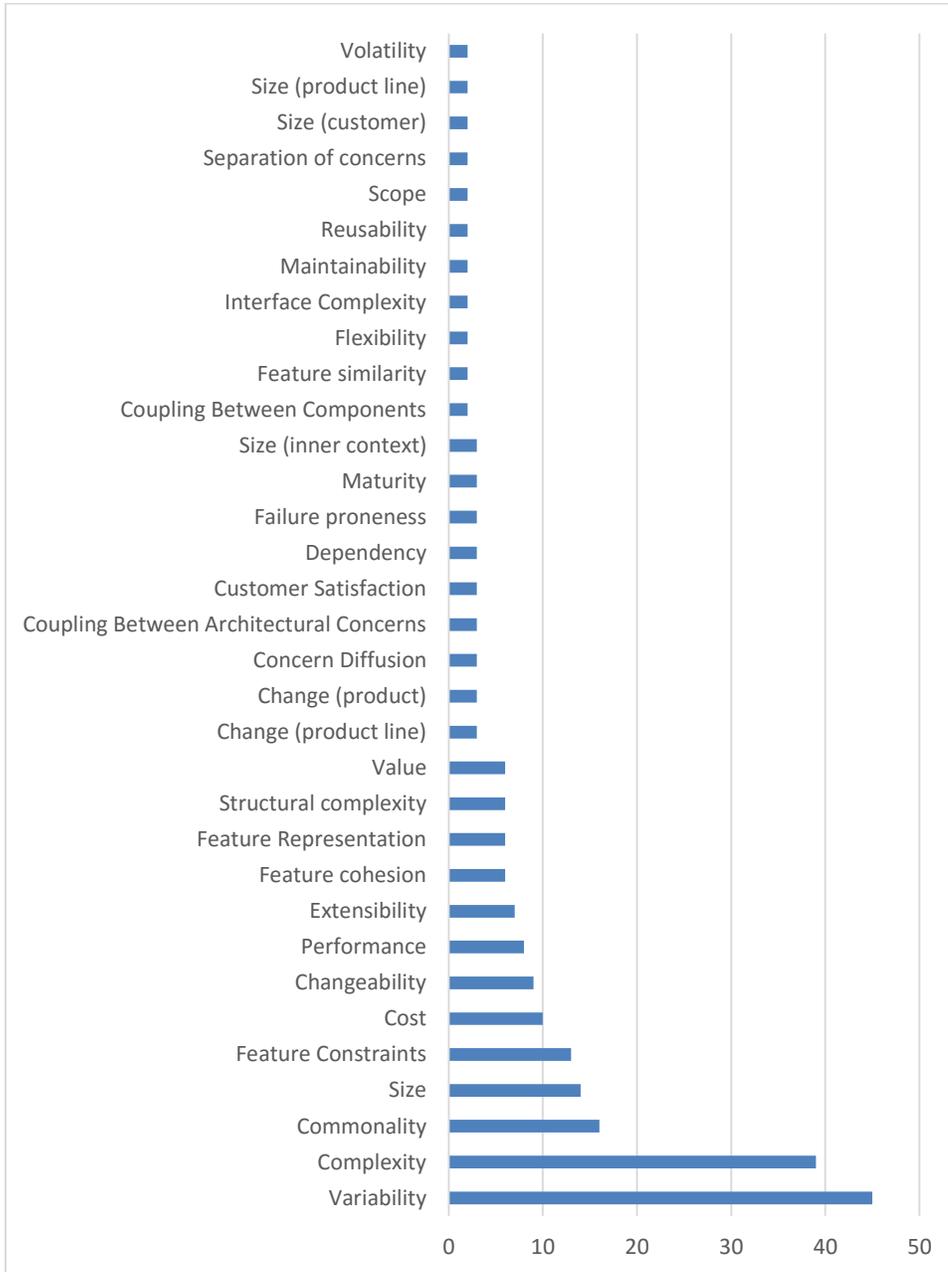
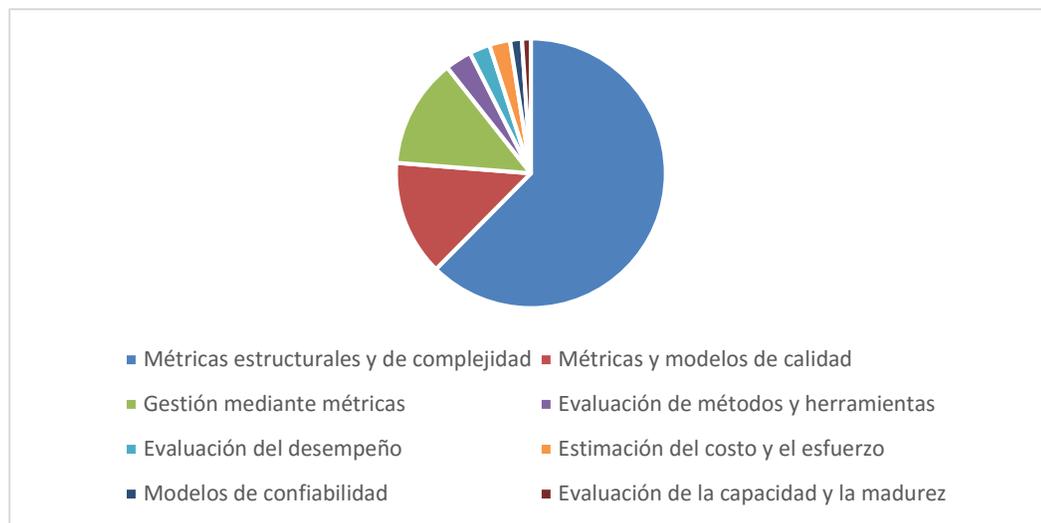
Figura 2-14: Atributos más estudiados en la literatura de la medición de las LPs.

Figura 2-15: Ámbito de la medición.



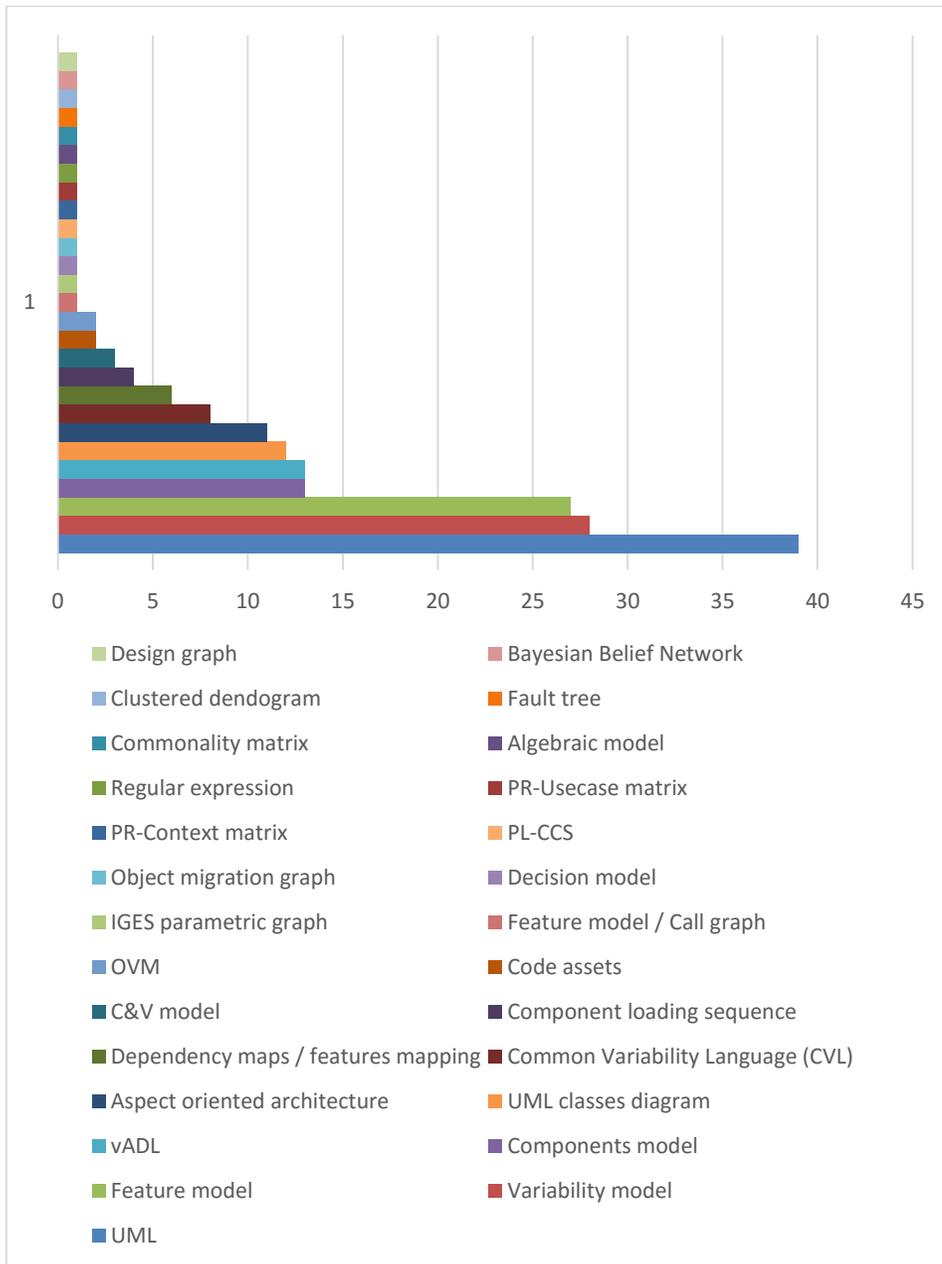
RQ6. ¿Qué métricas se estudian en la ILP?

En el presente estudio se encontraron 282 métricas diferentes para medir 80 atributos. En el Anexo A se listan estas métricas, así como los datos de interés de las mismas, listados en la Sección 2.1.7, y que se usaron para responder las preguntas de investigación.

RQ7. ¿Qué modelos se usan en las métricas encontradas?

La notación de modelado más usada en las métricas encontradas fue la notación UML, que se usa en el 18% de los casos (Figura 2-16). A ésta le sigue el diagrama de características (*feature diagram* en inglés), usada en el 10% de los casos. Sin embargo, llama la atención que en muchos casos se haga uso de una notación creada en el momento mismo de definir la métrica. Por otra parte, es preocupante el hecho de que el 35.5% de las métricas definidas (más de la tercera parte) no hagan referencia a una notación de modelado específica, lo que dificulta su aplicación efectiva en cualquier entorno.

Figura 2-16: Notaciones de modelado más usadas.



RQ8. ¿Cómo están definidas las métricas?

Las métricas encontradas fueron definidas de diversas formas. En la mayor parte de los casos, esta definición depende de la notación de modelado usada, y solo en unos pocos casos se apeló a una definición formal. El 94% de las medidas tomadas para la definición de las métricas estudiadas son objetivas, es decir, no incluyen ningún criterio o juicio subjetivo de la persona que las toma (Figura 2-17). El 58%, se trata de medidas

indirectas, o sea que se derivan de medidas directas tomadas de otros atributos, comúnmente siendo producto de un cálculo (Figura 2-18).

Llama la atención que, si bien se puede distinguir el tipo de escala de una medida, siendo en su mayoría del tipo *ratio*, definido en la Sección 1.2.1 (Figura 2-19), el 86% de las métricas carecen de escala, al menos nominalmente (Figura 2-20). Es decir, si bien las métricas pueden poseer escala, estas no cuentan con una unidad definida, lo cual dificulta procesos dependientes de la escala como la conversión entre medidas.

Figura 2-17: Medidas objetivas o subjetivas.

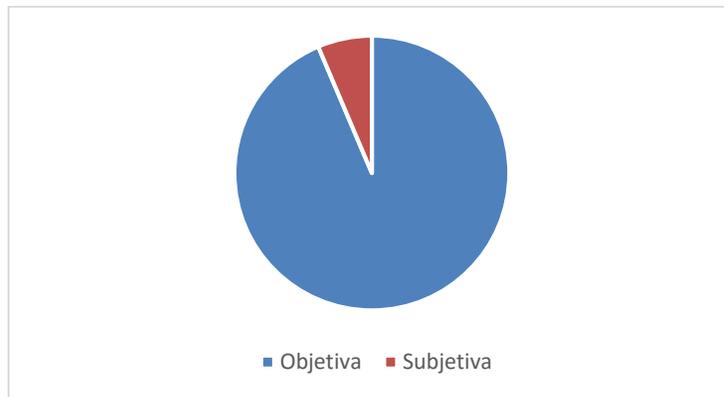


Figura 2-18: Medidas directas o indirectas.

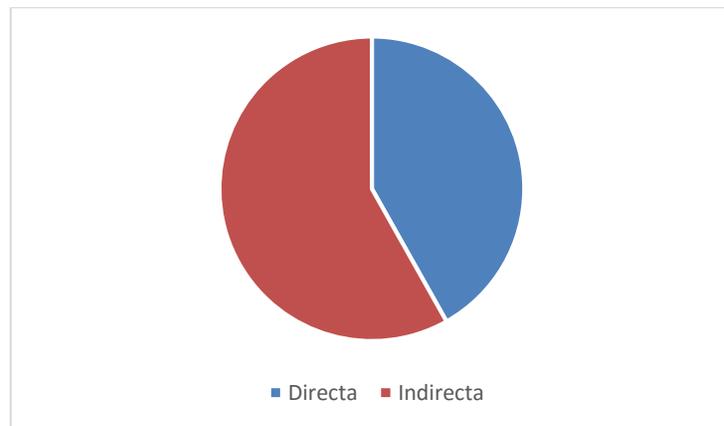


Figura 2-19: Tipos de escala en la medida.

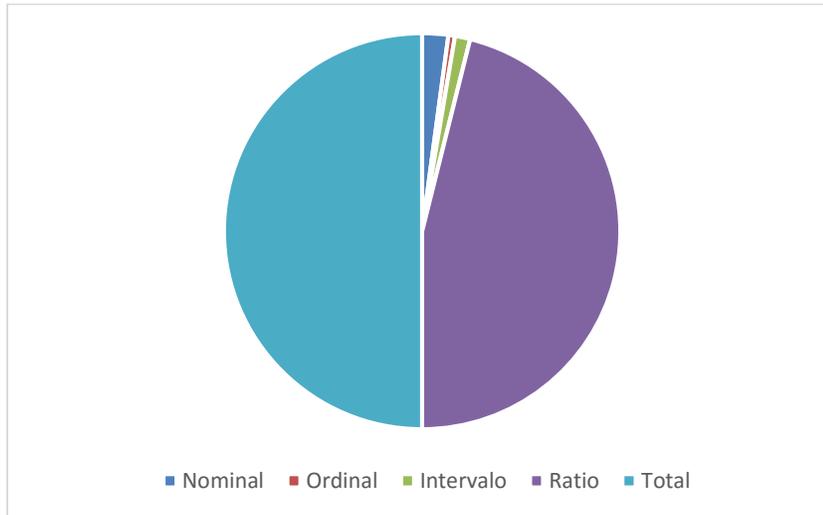
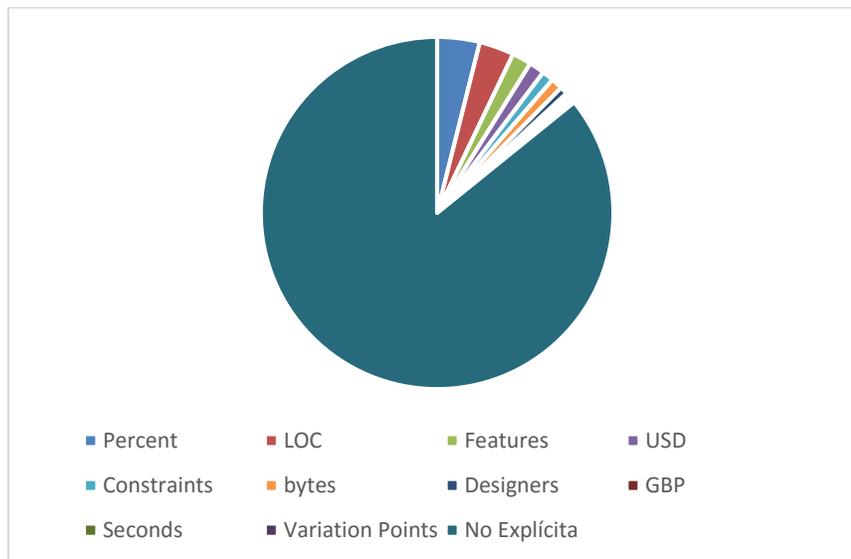


Figura 2-20: Escalas utilizadas.



RQ9. ¿En qué etapa del ciclo de vida de la línea de productos se usa la métrica?

El 50% de las métricas encontradas se definen para la fase de implementación del dominio (Figura 2-21), que resulta de la intersección entre el espacio de la solución y la ingeniería del dominio (ver Figura 1.2). Las fases de análisis del dominio y de derivación casi engloban el 50% de las métricas restantes. Por otro lado, para la fase de configuración y personalización, intersección entre el espacio del problema y la ingeniería de la aplicación, solo se encontraron 4 métricas definidas (menos de un 2%). Esto denota

una brecha en la investigación de la medición en esta etapa de la ILP, lo que a su vez constituye una oportunidad para la definición de métricas para procesos desatendidos.

Figura 2-21: Etapa en el ciclo de vida de la LP.



RQ10. ¿Cuál es el tipo de la entidad medida por una métrica dada?

La mayor parte de las métricas propuestas se enfocan en medir un producto, entendiendo éste como una línea de productos, una configuración o cualquier otro artefacto producto de la ILP (Figura 2-22). A su vez, el 71% de las métricas se proponen para medir entidades dentro del contexto específico de la ingeniería de líneas de productos de software (Figura 2-23), lo que muestra el peso comparativo de este paradigma dentro de la ingeniería de software, respecto a otras ramas de la ingeniería.

Figura 2-22: Tipo de entidad medida.

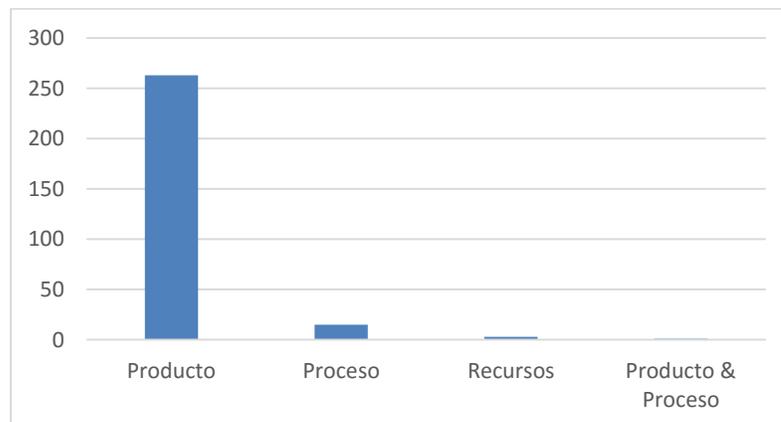
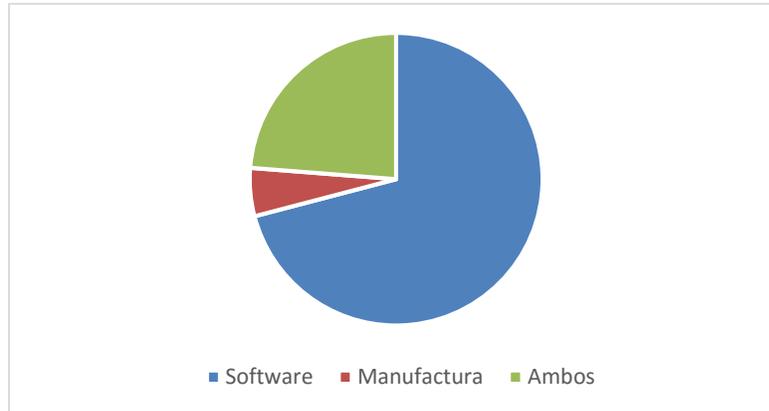


Figura 2-23: Tipo de línea de productos.



RQ11. ¿Las métricas encontradas en la literatura están validadas apropiadamente?

Se encontró que la mayor parte de las métricas propuestas en la literatura no cuentan con una validación apropiada. Menos del 10% de éstas fueron validadas teóricamente (Figura 2-24). Respecto a la validación empírica, el 32.6% de las métricas se validó mediante un caso de estudio, sin embargo, el 62.4% no fueron validadas empíricamente (Figura 2-25).

Figura 2-24: Validación teórica.

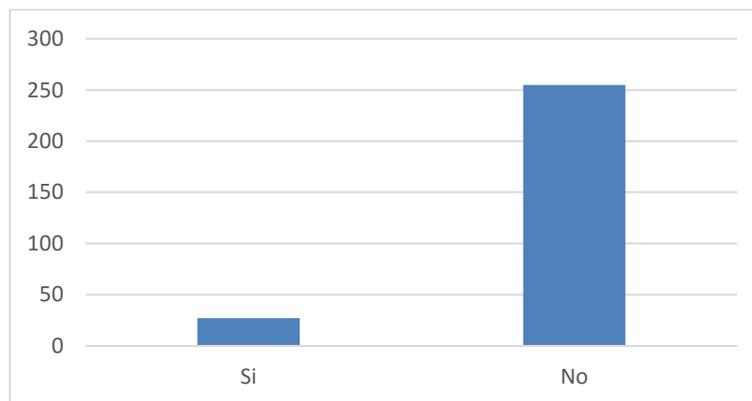


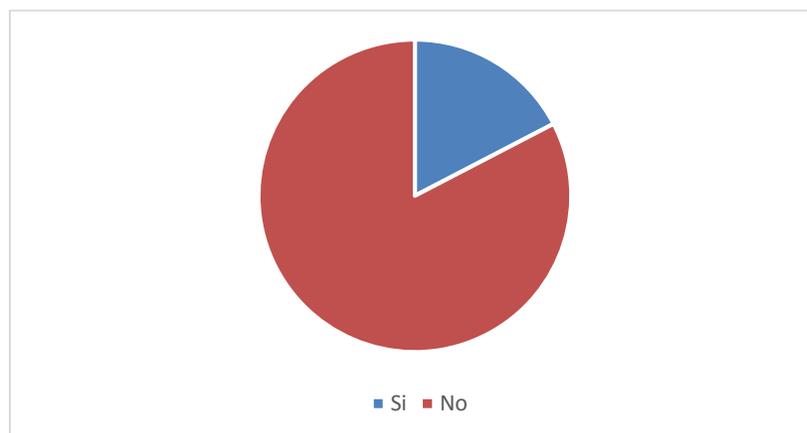
Figura 2-25: Tipo de validación empírica.



RQ12. ¿Los estudios encontrados en la literatura soportan la automatización de la medición?

Los estudios encontrados propusieron un modo de automatización de la medición solo para el 17.3% de las métricas (Figura 2-26), lo cual deja en deuda las propuestas en este sentido y a su vez constituye una oportunidad de trabajo futuro para la investigación en el campo.

Figura 2-26: Soporte a la automatización.



RQ13. ¿Alguna faceta del framework propuesto presenta una brecha de investigación?

Se encontraron tres brechas de investigación principales en los estudios revisados:

- En la faceta de validación (F_5), se encontró que la mayor parte de las métricas carecen tanto de validación teórica como de validación empírica.

- En la faceta de soporte de la automatización (F_6), se encontró que muy pocos estudios cuentan con propuestas encaminadas a la automatización de la medición, limitándose a la definición teórica de las métricas.
- Finalmente, en la faceta del ciclo de vida de la ILP (F_3), se pudo constatar la casi total ausencia de propuestas de medición para la fase de configuración y personalización, la cual corresponde a la intersección del espacio del problema y la ingeniería de la aplicación (ver Figura 1.2).

2.3 Análisis y discusión

En la literatura se pueden encontrar diferentes trabajos donde se proponen métricas en la ingeniería de líneas de productos. Los atributos más medidos por estas métricas son la variabilidad, la complejidad y la proporción de variables comunes (*commonality*). Así pues, la mayor parte de las métricas propuestas se ocupan de atributos estructurales y de calidad. La gran cantidad de métricas existentes para la medición de determinados atributos pueden denotar no solo la importancia de estos, sino también, en muchos casos, la falta de consenso sobre cómo medirlos.

El grado de formalización en la definición de las métricas encontradas es muy heterogéneo. Lo que más llama la atención en este sentido, es que en la mayor parte de los casos no se especifica un lenguaje de modelado a usar, ni se define la escala de la medida.

La falta de una validación apropiada de la mayor parte de las métricas estudiadas, implica la necesidad de un acercamiento más riguroso en este tópico de investigación. Esto contribuiría a ponderar mejor la validez, la eficacia y la utilidad de las métricas propuestas.

Así también, se debe contemplar más la propuesta de herramientas u otros mecanismos para la automatización del proceso de medición a la hora de proponer las métricas, ya que esto facilitaría su aplicación inmediata dentro de cualquier contexto.

Finalmente, la fase de configuración y personalización (que es una intersección entre la ingeniería de aplicación y el espacio de problema) se evidencia como un tema interesante para trabajos futuros en la medición de líneas de productos. Se deberían encaminar esfuerzos orientados a determinar por qué no existen más métricas en esta

etapa del ciclo de vida de las líneas de productos. Esto puede llevar a propuestas para la medición en esta etapa de la ingeniería de líneas de productos, comprendiendo aspectos como el por qué o la necesidad de definir las métricas, los atributos a medir, y finalmente, la definición y validación de dichas métricas.

2.4 Trabajos relacionados

En la literatura se encuentran algunos estudios secundarios sistemáticos sobre medición, tanto en la ingeniería de software en general [44] como en la ingeniería de líneas de productos en particular. Para este segundo tópico se encuentran dos SMS, sobre las pruebas en la ingeniería de líneas de productos [49], [50]. También se encuentra uno sobre la medición de atributos de calidad [3] y otro sobre la evaluación de enfoques de gestión de la variabilidad [51]. Así como estudios secundarios no sistemáticos, tal como uno sobre la medición en entornos industriales [9].

A diferencia de los trabajos anteriores, el presente SMS se hizo con el objetivo de tener un panorama general de la medición en la ingeniería de líneas de productos. Por eso, éste permite observar una mayor cantidad de variables que caracterizan las métricas y los distintos contextos en las que se usan. Así, no solo se están cubriendo aspectos particulares de la medición en la ingeniería de líneas de productos como la calidad o el costo, sino obteniendo una visión amplia del tema.

3. Solución propuesta

En el capítulo anterior, se hizo una caracterización detallada de los aspectos que comprenden la medición en las líneas de productos. Ésta se hizo mediante la elaboración de un *systematic mapping study*, cuyos resultados permiten saber qué, cómo y cuándo se mide en la ingeniería de líneas de productos. En este capítulo, se presenta un *framework* para la medición en la ingeniería de líneas de productos.

3.1 *Framework* para la medición en la ingeniería de líneas de productos

En esta sección se presenta el *framework* propuesto para la medición en la ingeniería de líneas de productos, se trata específicamente de un *framework* conceptual. Smyth [52] define un *framework* conceptual como un marco de trabajo estructurado mediante “un conjunto de ideas y teorías que ayudan a un investigador a identificar apropiadamente el problema que se está buscando, a enmarcar sus preguntas y a encontrar una literatura previa apropiada”. El *framework* propuesto a continuación tiene como objetivo proveer un marco conceptual, el cual facilite la definición y aplicación de métricas en la ingeniería de líneas de productos. Esto permite especificar de forma clara y precisa los conceptos relacionados con la medición y su lugar dentro de la ingeniería de líneas de productos. También busca guiar el proceso de definición de una métrica mediante la adaptación de enfoques que faciliten su claridad conceptual y su aplicación [18][53].

3.1.1 Antecedentes

En la literatura se pueden encontrar diferentes trabajos en los cuales, o bien se propone un marco teórico para la medición en general, o se propone un *framework* de medición para un dominio específico, por ejemplo, *frameworks* de medición orientados a la modularidad [10] o a la reusabilidad [11]. A continuación se presentan algunos de ellos.

Zuse [6], y Fenton y Pfleeger [35], proponen marcos conceptuales para la medición en la ingeniería de software. En el primero se busca aplicar la teoría de la medición [54] siempre que sea posible, extendiéndola cuando sea necesario. En el segundo, no se enfocan en aplicar la teoría de la medición, y en su lugar, proponen un acercamiento basado en metas. Ambos trabajos proponen un marco conceptual amplio y riguroso para la medición en la ingeniería de software. Sin embargo, son trabajos muy densos, lo cual dificulta su aplicación en entornos no académicos.

Se pueden encontrar también estándares de medición. Por un lado, la IEEE [19] presenta un estándar para la definición de una metodología de métricas de calidad en la ingeniería de software. Éste consta de un glosario de términos relacionados con la medición y un esquema jerárquico para la definición de factores y sub-factores de calidad, de los cuales se derivan las métricas definidas. Por otro lado, el *Joint Committee for Guides in Metrology* (JCGM) definió el Vocabulario Internacional de Metrología, referido frecuentemente en la literatura como VIM. En el VIM se establece un vocabulario exhaustivo de la medición en general. Éste constituye un estándar *de facto* en el área de estudio de la medición, debido a su rigurosidad. Sin embargo, no está orientado a la ingeniería de software y de hecho, incluye conceptos que no pueden ser aplicados en esta área. Si bien, en ambos casos se definen claramente terminologías para la medición, éstas no constituyen *frameworks* que faciliten la aplicación de dichas métricas.

También es posible encontrar *frameworks* para la medición en ingeniería de software. Uno de los primeros trabajos en la materia es el de Basili [53], en el cual el autor propone el paradigma *Goal/Question/Metric* (GQM). Éste facilita la definición de una métrica, partiendo de un objetivo a alcanzar por la organización y unas preguntas que se deben responder, para medir el grado con el cuál se logra dicho objetivo. Por otro lado se encuentran trabajos como los de Kitchenham *et al.* [18], Puroo y Vaishnavi [55], García *et al.* [4] y Habra *et al.* [56], en los cuales se proponen diferentes marcos conceptuales para la definición de métricas y de procesos de medición en la ingeniería de software. Si bien, los trabajos anteriores abordan la definición de métricas en la ingeniería de software tradicional, presentan dos limitantes respecto al objetivo del presente trabajo. La primera limitante consiste en que todos buscan generar un consenso sobre cómo medir y sobre una terminología unificada para la medición en la ingeniería de software, consenso que se muestra esquivo, tratándose en todos los casos de resultados diferentes y a menudo contradictorios. La segunda limitante es que los trabajos anteriores se enfocan en la

definición de métricas en la ingeniería de software tradicional, dejando por fuera aspectos importantes de la ingeniería de líneas de productos. Esto debido a que en la ingeniería de líneas de productos no se definen métricas en función de un solo producto, sino de una familia de productos [3].

Finalmente, se encuentran *frameworks* de medición aplicables a la ingeniería de líneas de productos. Sant'Anna *et al.* [10], proponen un *framework* para la evaluación de la modularidad de arquitecturas de software, el cual consiste en una lista de métricas definidas para tal fin. Por su parte, Her *et al.* [11] proponen un *framework* para evaluar la reusabilidad de los *core assets* (o activos del núcleo) de una línea de productos. Éste se define como un marco conceptual y una lista de atributos y métricas, las cuales se deben tener en cuenta para la evaluación de la reusabilidad de los *core assets*. De estos trabajos se puede concluir que, si bien están orientados a la medición de determinados atributos en algunos de los artefactos de las líneas de productos, no proveen un marco conceptual que permita definir métricas a lo largo del ciclo de vida de las líneas de productos.

Dadas las limitantes expuestas anteriormente en los trabajos encontrados, en el presente capítulo se propone un *framework* de medición para la ingeniería de líneas de productos. Éste facilita la definición de métricas a lo largo del ciclo de vida de una LP, proveyendo un marco conceptual y pautas que faciliten dicha definición teniendo en cuenta conceptos generales del área de la medición y conceptos particulares de la ingeniería de líneas de productos.

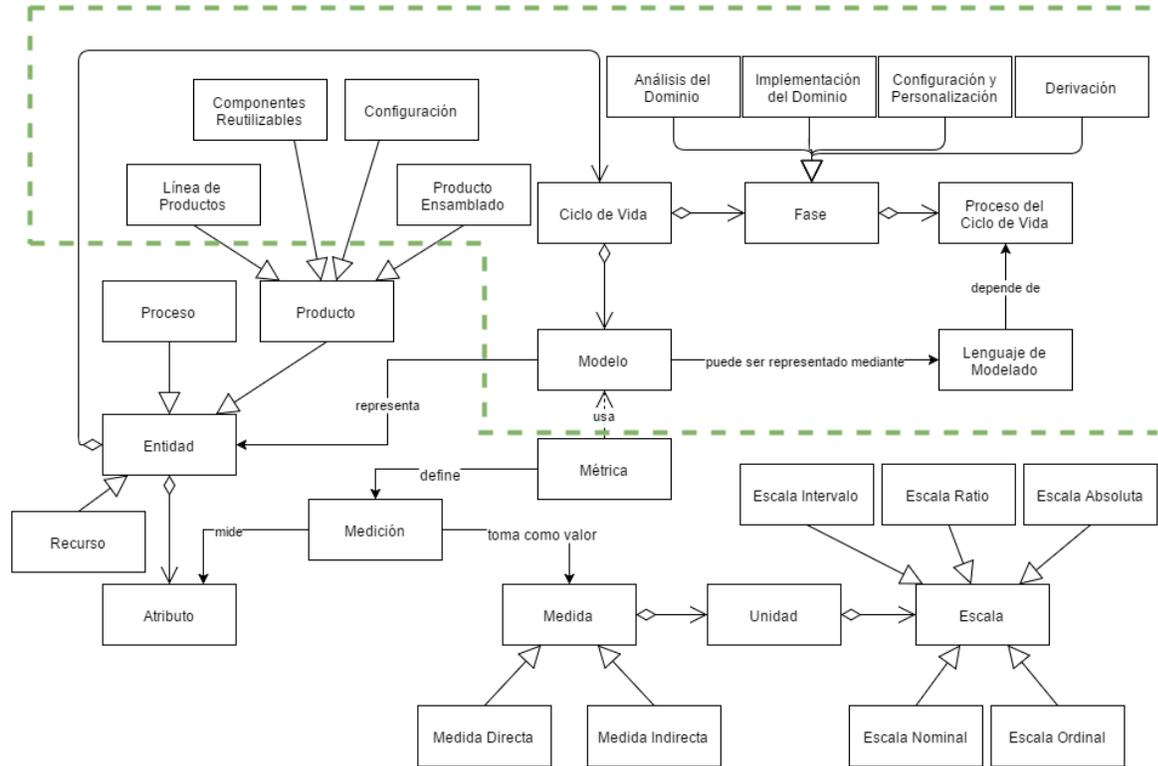
3.1.2 Modelo propuesto

A continuación se presenta el *framework* propuesto para la medición en la ingeniería de líneas de productos (Figura 3-1). Este *framework* comprende un conjunto de conceptos y de relaciones entre ellos. Se trata de un modelo de dominio, representado con la notación del diagrama de clases de UML. En la Figura 3-1 se muestran los conceptos que se deben tener en cuenta al momento de definir una métrica en ingeniería de líneas de productos, así como la relación entre estos. En el *framework* propuesto se pueden observar dos perspectivas: La primera, son los conceptos clave en la medición en la ingeniería de software. La segunda perspectiva, delimitada mediante una línea

discontinua verde, son los conceptos relacionados con la ingeniería de líneas de productos que se deben tener en cuenta en el proceso de medición.

Figura 3-1: *Framework* para la medición en la ingeniería de líneas de productos.

Fuente: Elaboración propia.



Durante el proceso de medición, es necesario tener claridad conceptual; esto ayuda no solo a la definición de métricas válidas [18], sino también al uso efectivo de las mismas [3]. En muchos casos, este último aspecto no se considera, como se constató en la revisión de literatura expuesta en el presente trabajo (ver Capítulo 2). Con el fin de facilitar la comprensión y la aplicación del *framework* propuesto, a continuación se exponen los conceptos inherentes al mismo.

Al momento de definir una métrica, en primer lugar, es necesario definir la **entidad**. Una entidad, es el objeto o evento del mundo real que se va a medir [35]. Así como en un entorno de manufactura, una entidad puede ser un bien fabricado o una pieza del mismo, en ingeniería de líneas de productos, una entidad puede ser una línea de productos completa, un componente reutilizable o incluso el proceso de desarrollo del mismo.

En el proceso de medición, una entidad puede ser de tipo producto, proceso o recursos [41]. El **proceso**, describe las actividades que se llevan a cabo durante el desarrollo de un producto, o en este caso, de una línea de productos [41]. El **producto**, es cualquier resultado concreto del proceso, en ILP éste puede ser: la línea de productos, una configuración, un conjunto de componentes reutilizables o un producto ya terminado. Finalmente, los **recursos** son las entradas o insumos necesarios para ejecutar el proceso, tales como hardware, software o personal [41].

Una entidad de cualquier tipo posee atributos. Un **atributo** es una propiedad física o abstracta medible de una entidad [19]. Por ejemplo, una línea de productos posee atributos como el grado de variación, que es el grado en el cual ésta cuenta con características variables, en contraste con sus características comunes [57]. También se pueden observar de manera más intuitiva los atributos de entidades físicas como son el peso, el volumen o la temperatura de un objeto.

A continuación, se debe definir cómo se mide un atributo. Esto se lleva a cabo mediante la **medición**. La medición es el proceso mediante el cual se le asigna una **medida** a la entidad, describiendo el grado con el cual ésta posee un atributo dado [19]. Esta **medida** puede ser un número o símbolo [41], y puede ser directa o indirecta dependiendo de cómo se obtenga. Una medida **directa** es aquella que se puede obtener directamente, ya que no requiere, ni se relaciona con la medición de otros atributos [35]. Un ejemplo de una medida directa es el número de características de un modelo de características o el número de restricciones presentes en éste. Por otro lado, una medida **indirecta** está relacionada con la medición de otros atributos, y por lo general, se deriva de la medición de estos [35]. Un ejemplo de una medida indirecta es la densidad de defectos de un modelo de variabilidad, la cual es producto de un cálculo que involucra el número de variables del modelo y el número de defectos presentes en el mismo [1]. Una medida puede ser, además, subjetiva u objetiva. Una medida **subjetiva** es aquella en la que hay un juicio o criterio por parte del sujeto que la hace, influyendo en su resultado [35]. Por otro lado, en una medida **objetiva** no existe influencia de ningún tipo de juicio por parte del sujeto y por el contrario, depende completamente de la entidad y el proceso de medición [35].

Una propiedad importante a tener en cuenta al definir una métrica válida es su unidad [18]. La **unidad** de una medida provee valiosa información de la misma [18]. Por ejemplo,

no es posible determinar de manera confiable la longitud de un objeto sin expresar su unidad, que podría ser centímetros, pies o kilómetros. Conocer la unidad de una medida permite saber, entre otras cosas, las posibilidades de transformación entre unidades de la misma, lo cual viene determinado por su escala [35]. La **escala** es el modo en el que se hace el mapeo del atributo desde la entidad medida (mundo real) al mundo formal o matemático [35]. La escala puede ser de uno de cinco tipos. De tipo **nominal**, es decir, que mapea el atributo de una entidad a un nombre o símbolo predefinido sin que este tenga una magnitud asociada. De tipo **ordinal**, que clasifica las entidades de acuerdo a un criterio de ordenamiento sin que haya un valor de magnitud significativo asociado a cada clase. De tipo **intervalo**, usada cuando la diferencia entre dos medidas es significativa, más no su valor ni la proporción entre dos valores dentro de la escala. De tipo **ratio**, que es cuando existe un valor cero, es decir, que es posible la ausencia del atributo medido, y la proporción entre dos escalas es significativa. Y de tipo **absoluta**, que es un caso especial del tipo *ratio*, en el cual se mide mediante el conteo de elementos en un conjunto de entidades, esto implica que el valor en sí de la medida es la única transformación significativa [35].

Cabe resaltar que aunque la escala es una propiedad importante de una medida, en la mayor parte de las métricas estudiadas en la revisión de literatura del presente trabajo, ésta no se hace explícita.

Finalmente, respecto a la medición tenemos el concepto de **métrica**, que se define como una función que cuenta con entradas y una salida definidas, y mediante la cual se asigna un valor que describe un atributo de una entidad dada [19]. Es precisamente esta función en la que queda definido no solo el proceso de medición sino también sus entradas y las propiedades de su salida.

Como puede apreciarse en la Figura 3-1, el concepto Métrica se relaciona con conceptos pertenecientes al dominio de la ingeniería de líneas de productos. Nuestra propuesta los considera necesarios en la definición de una métrica dentro de este dominio.

En la definición de una métrica, es común el uso de modelos. Un **modelo** es una representación abstracta de la entidad, la cual facilita su medición. Éste facilita la definición de una métrica que caracterice, efectivamente, un atributo de la entidad, independientemente del significado intuitivo (y a veces ambiguo) que pueda tener ésta [18]. Como en otras ramas de la ingeniería, en la ingeniería de líneas de productos un

modelo puede ser representado mediante un **lenguaje de modelado**. Por ejemplo, en un modelo de variabilidad, se pueden usar diferentes lenguajes de modelado (como *feature models* u *OVM*) y en el modelo de componentes se puede usar la notación UML.

En este punto es conveniente retomar el concepto de entidad. Toda entidad que se va a medir cuenta con un **ciclo de vida**, el cual en la ingeniería de líneas de productos son las fases o etapas por las que atraviesa una línea de productos desde su concepción hasta la obtención de productos concretos [1]. Para el presente trabajo se tienen en cuenta cuatro **fases**: el análisis del dominio, la implementación del dominio, la fase de configuración y personalización y la fase de derivación [25] (ver 1.2.1).

A su vez, las fases comprenden, cada una, un conjunto de **procesos del ciclo de vida**. La fase de **análisis del dominio** comprende los procesos de ingeniería de requisitos del dominio, de definición de la arquitectura de referencia de la LP y de modelado de la variabilidad [25]. La fase de **implementación del dominio** comprende los procesos de ingeniería de requisitos, de definición de la arquitectura, de implementación, de realización de pruebas unitarias y de enlace. La fase de **configuración y personalización** comprende los procesos de ingeniería de requisitos, de análisis, de definición de la arquitectura y de personalización. Y la fase de **derivación**, comprende los procesos de ingeniería de requisitos, de definición de la arquitectura, de implementación y de pruebas de integración.

Como se pudo constatar en la revisión de literatura, el lenguaje de modelado del modelo usado en la definición de la métrica, depende en gran medida del proceso del ciclo de vida en el que se desea usar la misma. Por ejemplo, una métrica definida para un proceso de la fase de análisis del dominio, por lo general, hace uso de un modelo de variabilidad, el cual a su vez puede ser un modelo de características (*feature model*), o un modelo OVM, entre otros.

3.1.3 Pautas para la definición de una métrica

En la presente sección se establecen unas pautas para la definición de métricas en la ingeniería de líneas de productos. Estas tienen en cuenta los conceptos del *framework* propuesto, los cuales contribuyen a la definición de métricas válidas y a facilitar su aplicación.

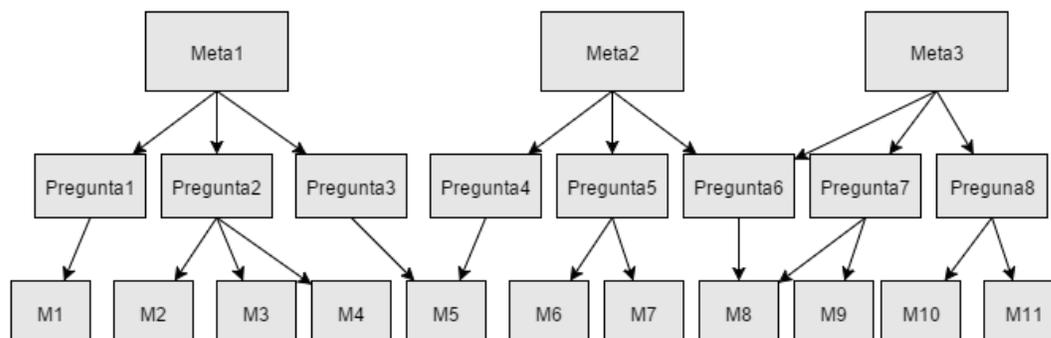
En primer lugar, es necesario definir el porqué de la métrica, es decir, el motivo o el objetivo que se desea lograr al definirla y aplicarla. Uno de los métodos más usados [58][59][60] para este fin es el paradigma *Goal/Question/Metric* (GQM) [53]. El paradigma GQM es un mecanismo para la definición de metas u objetivos operacionales, y su evaluación usando métricas. Se trata de un enfoque sistemático en el que se establece una relación entre las metas y los modelos de procesos y productos industriales [61] y de software [19], con base en necesidades específicas de un proyecto o de la organización [19]. Si bien el paradigma GQM fue desarrollado para su aplicación en un proyecto específico, su uso se ha expandido a un contexto más amplio [62].

Aplicar el paradigma GQM implica [19][53]:

1. Desarrollar un conjunto de metas de calidad y productividad a nivel corporativo, de división y/o de proyecto.
2. Generar preguntas (con base en modelos) que definan las metas anteriores de forma tan completa y cuantificable como sea posible.
3. Especificar las métricas necesarias para responder dichas preguntas y rastrear su conformidad con las metas inicialmente planteadas.
4. Desarrollar mecanismos de recolección de datos.
5. Obtener, validar y analizar los datos en tiempo real, de tal modo que se pueda obtener retroalimentación hacia los proyectos y se pueda validar la conformidad de los resultados con las metas.

La transición entre las metas y las métricas puede verse como un grafo dirigido, donde el flujo va de las metas a las preguntas y de las preguntas a las métricas.

Figura 3-2: Representación del paradigma *Goal/Question/Metric* (GQM). Fuente: Adaptado de Basili [53].



La definición de metas y su refinamiento en preguntas cuantificables es un proceso complejo y requiere experiencia [19]. Para facilitar este proceso, el paradigma GQM propone una plantilla útil al momento de definir métricas [53]. Esta plantilla posee cinco dimensiones: el **objeto**, el **propósito**, el **enfoque**, el **punto de vista** y el **entorno**. Un ejemplo de una meta definida mediante esta plantilla es: “Monitorear un proyecto de software (el **objeto**) objetivamente durante la duración del proyecto para obtener su estado (**propósito**) respecto al tamaño, complejidad, costo y calidad (**enfoque**) desde la perspectiva de los interesados (**punto de vista**) dado un alto índice de fallos debido a una falta de visibilidad de la gestión (**entorno**)”.

Una vez se establecen la meta y las preguntas que se desean resolver mediante la métrica, se procede a la definición de la misma. A continuación se presenta una serie de 5 pasos para tal fin.

Paso 1. Definición de la entidad que se va a medir. En este punto, se define de qué tipo de entidad se trata, si se trata de un producto, de un proceso o de recursos.

Paso 2. Definición de la fase y el proceso del ciclo de vida para los cuales se desea definir la métrica. Esto permite tener una mayor claridad a la hora de determinar cuándo y qué atributos se van a medir con ésta. Así, dependiendo de la fase, la entidad puede ser una línea de productos, una configuración, un conjunto de componentes reutilizables o un producto ensamblado. Además, como se muestra en la Tabla 3-1, tener claridad respecto a cuándo se va a medir la entidad, da una pista sobre qué atributos se pueden medir.

Paso 3. Definición del atributo que se va a medir. En la Tabla 3-1 se muestra una lista de los atributos medidos en ingeniería de líneas de productos. Esta lista se obtuvo a partir de la revisión de literatura llevada a cabo en el presente trabajo. También se muestra su correspondencia con fases y procesos del ciclo de vida de las líneas de productos. Si bien las fases y procesos descritos corresponden a los usados a lo largo del presente trabajo, tanto en ésta, como en la Tabla 3-2, se presentan en idioma inglés, ya que es en este idioma en el que se encuentran la totalidad de los trabajos en los que se estudia la medición de atributos en ingeniería de líneas de productos.

Tabla 3-1: Atributos medidos en ingeniería de líneas de productos.

Fase	Proceso	Atributo
Configuración y personalización	Configuración	Requirements of performance for a product
	Definición del alcance del portafolio de productos	Requirements Conformance
		Requirements Stability
Derivación	Ensamblado	Commonality
		Complexity
		Feature cohesion
		Size
		Variability
	Derivación	Adaptability
		Binary size
		Change (product)
		Commonality
		Cost
		Customer Satisfaction
		End-to-End (E2E) Test Coverage
		Integration Test Coverage
		Optimum value
		Performance
		Reuse
		Sales (customer)
		Size (customer)
		Size (inner context)
		Size (product)
		Total probability of offering a product
		Uncertainty
		Value
Variability		
Vector of constraints for a product		
Análisis del dominio	Definición del alcance del dominio	Commonality
		Corporate Impact
		Cost
		Feature similarity
		Likelihood of Success
		Platform effectiveness
		Platform efficiency
		Return on Investment
	Validación	Degradation
		Quality
	Modelado de la variabilidad	Commonality
		Complexity

		Complexity of variants	
		Complexity of variation points	
		Dependency	
		Feature Constraints	
		Feature Representation	
		Feature similarity	
		Footprint	
		Impact on Quality	
		Length	
		Maintainability	
		Performance	
		Separation of concerns	
		Size	
		Software Safety	
		Structural complexity	
		Variability	
		Variation Degree	
		Verificación	Failure proneness
			Flexibility
	Maintainability		
Implementación del dominio	Definición de la arquitectura	Commonality	
		Complexity	
		Extractability	
		Reusability	
		Scope	
		Similarity	
		Variability	
		Volatility	
	Diseño	Applicability	
		Commonality	
		Complexity	
		Complexity of Interfaces and Integration	
		Component Cohesion	
		Component Replaceability	
		Concern Diffusion	
		Coupling Between Architectural Concerns	
		Coupling Between Components	
		Extensibility	
		Functional Commonality	
		NFR Commonality	
Tailorability			

		Understandability
		Variability
		Variability Richness
	Desarrollo	Change (product line)
		Changeability
		Growth (product line)
		Impact of change (product line)
		Interface Complexity
		Size (product line)
	Definición del alcance de los componentes reutilizables del dominio	Cost
		Maturity
		Software Engineering Environment
		System Resource Utilization
		Time-to-market
	Ingeniería de requisitos de los componentes reutilizables del dominio	Commonality
		Cost reduction
		Customer Satisfaction
		Variability
	Pruebas unitarias	Fault Profiles
		Reliability

Paso 4. Definición del lenguaje de modelado que se va a usar en la definición de la métrica. El lenguaje de modelado determina en gran medida el procedimiento de medición, ya que de éste dependen, por ejemplo, los elementos que se tienen en cuenta en procedimientos operativos y fórmulas matemáticas. Como se mencionó anteriormente, es muy útil saber en qué fase y proceso del ciclo de vida se usará la métrica, ya que tanto las fases como los procesos tienen uno o varios lenguajes de modelado asociados. En la Tabla 3-2 se muestra una lista de los lenguajes de modelado usados en el proceso de medición en la ingeniería de líneas de productos, según se constató en el SMS realizado en el presente trabajo (ver 2.2.2).

Tabla 3-2: Lenguajes de modelado usados en la medición en ingeniería de líneas de productos.

Fase	Proceso	Lenguaje de modelado
Derivación	Ensamblado	Code assets
		Component loading sequence
		Components model

	Derivación	Dependency maps / features mapping
		Object migration graph
		Feature model
		Feature model / call graph
Análisis del dominio	Definición del alcance del dominio	Feature model
	Validación	PR-Context matrix
		Bayesian Belief Network
	Modelado de la variabilidad	Design graph
		Algebraic model
		Common Variability Language (CVL)
		Fault tree
		Feature model
		OM
		PL-CCS
		Regular expression
	Verificación	Variability model
Implementación del dominio	Definición de la arquitectura	Feature model
		Clustered dendogram
		Commonality matrix
		UML
		vADL
	Diseño	Aspect oriented architecture
		C&V model
		Components model
		Decision model
		IGES parametric graph
		UML
		UML classes diagram
	Desarrollo	Aspect oriented architecture
	Ingeniería de requisitos de los componentes reutilizables del dominio	PR-Usecase matrix
		UML

Paso 5. Definición del procedimiento de medición. Este paso incluye los aspectos operativos de la métrica, ellos son:

1. Definir qué tipo de medida se va a tomar (**directa** o **indirecta**).

2. Definir las unidades de la medida, lo que implica determinar su escala. Esto a su vez permite saber el tipo de escala, que puede ser **nominal**, **ordinal**, **intervalo** o **ratio**.
3. Definir paso a paso el procedimiento de toma de la medida, el cual se puede expresar mediante fórmulas matemáticas, conjuntos de pasos, descripciones formales, entre otros.

3.2 Definición de métricas en ILP utilizando el *framework* propuesto

Para ilustrar el uso del *framework* propuesto, a continuación se definen tres métricas, ellas son: porcentaje de configuración de producto, grado de reusabilidad de una característica, y grado de implementación del dominio. Para la definición de cada una de estas métricas se utilizó el *framework* propuesto y se siguieron las pautas expuestas en la sección anterior (ver 3.1.3). Con esto se busca la claridad y validez conceptual de las métricas, así como facilitar su aplicación en la ingeniería de líneas de productos.

3.2.1 Porcentaje de configuración de producto

En primer lugar, se define el propósito de la definición de la métrica. Esto se logra estableciendo una meta a alcanzar y una pregunta a responder con la métrica, apuntando a la meta. Para ello, se hace uso del paradigma GQM [53] explicado previamente (ver 3.1.3).

Meta: Monitorear un proyecto de desarrollo de una línea de productos (el **objeto**) durante el proceso de configuración (**propósito**) respecto al progreso del mismo (**enfoque**) desde la perspectiva del ingeniero encargado de la configuración (**punto de vista**) dado que se utiliza una herramienta que permita la configuración de productos progresiva usando un modelo de variabilidad OVM (**entorno**).

Pregunta: ¿Cómo conocer el grado de progreso del proceso de configuración de un producto de una línea de productos?

A continuación, se define la métrica usando el *framework* de medición propuesto y siguiendo los 5 pasos presentados en la Sección 3.1.3.

Paso 1. Definición de la entidad que se va a medir. La entidad a medir es una configuración (o producto configurado usando el modelo de variabilidad), que es una entidad de tipo Producto.

Paso 2. Definición de la fase y el proceso del ciclo de vida para los cuales se desea definir la métrica. La métrica se aplica en la fase de configuración y personalización del ciclo de vida de la LP, específicamente en el proceso de configuración.

Paso 3. Definición del atributo que se va a medir. El atributo a medir es el porcentaje configurado de un producto.

Paso 4. Definición del lenguaje de modelado que se va a usar en la definición de la métrica. El lenguaje de modelado usado es el *Orthogonal Variability Model* (OVM), además se usa conjunto de puntos de variación configurados del modelo.

Paso 5. Definición del procedimiento de medición.

El porcentaje de configuración de un producto (PCP) es la relación entre los puntos de variación ya implementados respecto al número total de puntos de variación de un modelo OVM de una línea de productos, y se define en la ecuación 3.1.

$$PCP = \left(\frac{\#PVTTC}{\#PV} \right) \times 100 \quad (3.1)$$

Donde PVTTC es el número de puntos de variación totalmente configurados y PVT es el número de puntos de variación totales del modelo (configurados o sin configurar). Tanto los puntos de variación configurados como los puntos de variación totales se pueden obtener mediante la herramienta de configuración usada durante el proceso. Para la presente métrica, se entiende por punto de variación totalmente configurado como aquel en el cual están resueltas todas sus variantes. Mediante este procedimiento se toma una medida indirecta, cuya unidad es por ciento (porcentaje) y cuyo de tipo de escala es *Ratio*.

3.2.2 Grado de reusabilidad de una característica

De igual manera que en la Sección 3.1.2, se usa el paradigma GQM [53], para definir la meta y la pregunta. Posteriormente, para definir la métrica se utiliza el *framework* propuesto en el presente trabajo.

Meta: Monitorear el modelado de la variabilidad de una línea de productos (el **objeto**) durante el análisis del dominio que permita un diseño apropiado y válido (**propósito**) respecto a la reusabilidad de características (**enfoque**) desde la perspectiva del ingeniero encargado del modelado del dominio (**punto de vista**) dada la necesidad de asegurar constantemente el diseño correcto del modelo de variabilidad (**entorno**).

Pregunta: ¿Cómo conocer la reusabilidad de una característica del modelo de variabilidad de una línea de productos?

A continuación, se define la métrica usando el *framework* de medición propuesto.

Paso 1. Definición de la entidad que se va a medir. La entidad a medir es una característica perteneciente a un modelo de características (*feature model*) que es una entidad de tipo Producto.

Paso 2. Definición de la fase y el proceso del ciclo de vida para los cuales se desea definir la métrica. La métrica se aplica en la fase de análisis del dominio, específicamente en el proceso de modelado de la variabilidad.

Paso 3. Definición del atributo que se va a medir. El atributo a medir es la reusabilidad.

Paso 4. Definición del lenguaje de modelado que se va a usar en la definición de la métrica. El lenguaje de modelado usado es el modelo de características (*feature model*).

Paso 5. Definición del procedimiento de medición.

El grado de reusabilidad de una característica (GRC) es la relación entre las configuraciones posibles de un modelo de variabilidad en las cuales esta característica está seleccionada respecto al total de configuraciones que es posible obtener de dicho modelo, y se define en la ecuación 3.2.

$$GRC = \left(\frac{\#CC}{\#CT} \right) \times 100 \quad (3.2)$$

Donde #CC es el número de configuraciones posibles de la línea de productos en las cuales la característica está presente y #CT es el número total de configuraciones posibles de la línea de productos. El número de configuraciones posibles con y sin la característica seleccionada se pueden obtener mediante operaciones de análisis en

ingeniería de líneas de productos presentes en herramientas como VariaMos [63]. Mediante este procedimiento se toma una medida indirecta, cuya unidad es por ciento (porcentaje) y cuyo de tipo de escala es *Ratio*.

3.2.3 Grado de implementación del dominio

Para definir esta métrica se procede de igual forma que en las dos anteriores (ver 3.2.1 y 3.2.2).

Meta: Monitoreo de la implementación del dominio de una línea de productos (el **objeto**) orientado hacia un pleno conocimiento del progreso de dicho proceso (**propósito**) respecto al desarrollo de artefactos propios de la ingeniería del dominio (**enfoque**) desde la perspectiva de los analistas, diseñadores y desarrolladores de artefactos (**punto de vista**) del espacio de la solución (**entorno**).

Pregunta: ¿Cómo conocer el progreso del proceso de implementación del dominio respecto a los resultados del análisis del dominio de una línea de productos?

A continuación, se define la métrica usando el *framework* de medición propuesto. Para esto, se usan los pasos propuestos con este fin (ver 3.1.3).

Paso 1. Definición de la entidad que se va a medir. La entidad a medir es el proceso de implementación del dominio de la línea de productos, que es una entidad de tipo Proceso.

Paso 2. Definición de la fase y el proceso del ciclo de vida para los cuales se desea definir la métrica. La métrica se aplica en la fase de implementación del dominio, específicamente en el proceso de implementación de componentes reutilizables.

Paso 3. Definición del atributo que se va a medir. El atributo a medir es el grado de implementación del dominio.

Paso 4. Definición del lenguaje de modelado que se va a usar en la definición de la métrica. El lenguaje de modelado usado es el modelo de características (*feature model*), así como un conjunto de componentes reutilizables ya implementados y enlazadas a características del modelo previo.

Paso 5. Definición del procedimiento de medición.

El grado de implementación del dominio (GID) es la relación entre las características del dominio ya implementadas mediante componentes reutilizables respecto al conjunto total de características presentes en la línea de productos, y se define en la ecuación 3.3.

$$GID = \left(\frac{\#CI}{\#CT} \right) \times 100 \quad (3.3)$$

Donde #CI serían el número de características implementadas como componentes o servicios y #CT sería el número de características totales del modelo. La obtención de los datos anteriores, depende en gran medida de la herramienta de gestión de la línea de productos usada. Ya que deben tenerse en cuenta artefactos como el modelo de características, los componentes reutilizables y los artefactos de trazabilidad entre los dos primeros. Mediante este procedimiento se toma una medida indirecta, cuya unidad es por ciento (porcentaje) y cuyo de tipo de escala es *Ratio*.

4. Validación

Con el fin de validar las métricas propuestas, en este capítulo se realiza un análisis teórico. Este tipo de análisis es usado en la literatura para la validación de *frameworks* de medición, tanto en ingeniería de software [64] como en ingeniería de líneas de productos [11].

El análisis teórico permite validar una métrica estableciendo si la misma cumple una serie de criterios o propiedades [11]. En la literatura se pueden encontrar diferentes enfoques para llevarlo a cabo, como son los propuestos por Briand *et al.* [65], Kitchenham *et al.* [18] y la IEEE [19].

4.1 Análisis teórico

En el presente trabajo se usa el *framework* para la validación de métricas propuesto por Kitchenham, Pfleeger y Fenton [18]. Según este trabajo, para afirmar que una métrica es válida, se debe confirmar: la validez del atributo, la validez de la unidad, la validez del instrumento de medición y la validez del protocolo de medición [18]. A continuación se explican cada uno de los anteriores criterios, y se procede a discutir si las métricas propuestas (ver 3.2) satisfacen cada uno de estos.

4.1.1 Validez del atributo

Como se explicó en la Sección 1.2.1, un atributo es una propiedad física o abstracta medible que posee una entidad [19]. Según Kitchenham *et al.* [18], una entidad puede poseer varios atributos, y un atributo puede calificar diferentes entidades. Además, afirman que un atributo puede ser unidimensional o multidimensional, midiéndose mediante magnitudes escalares (como la masa o la distancia) o vectoriales (como el peso o la distancia) respectivamente. Sostienen que si bien esta distinción no es muy

tenida en cuenta en la ingeniería de software, su entendimiento facilitaría la definición de métricas válidas dentro de esta área de estudio.

Un atributo es válido si éste es, efectivamente, exhibido por la entidad que se está midiendo. La validez de un atributo debe ser considerada tanto para atributos medibles directamente, como para atributos medibles indirectamente derivados de otros atributos [18]. El atributo en cuestión debe cumplir determinadas propiedades. En primer lugar, para ser medible, un atributo debe permitir distinguir dos entidades diferentes entre ellas. Además, debe ser posible que dos entidades diferentes puedan tener el mismo valor de medida de dicho atributo. Adicionalmente, una métrica válida debe cumplir la condición de representación, es decir, debe preservar el sentido intuitivo del atributo y la forma en que este distingue una entidad de otra [18].

En el caso de la métrica de **porcentaje de configuración de producto**, la entidad medida es la configuración, que es un conjunto de componentes reutilizables del dominio, que cumplen los requisitos del cliente y las restricciones del modelo de variabilidad, dando lugar a un producto [25]. El proceso de configuración, en el cual se construye dicha entidad, puede ser gradual, lo que permite que un producto sea parcialmente configurado, dando lugar al atributo expuesto.

En la métrica de **grado de reusabilidad de una característica**, se mide una característica perteneciente a un modelo de características. Por su parte, el atributo es la reusabilidad, que es el grado en que una característica o componente pueden ser reutilizados en diferentes productos [11]. Dado que una característica puede estar presente en un número determinado de configuraciones, entre todas las configuraciones posibles de una línea de productos, puede presentar cierto grado de reusabilidad. En la mayor parte de los casos, una línea de productos posee características con diferentes grados de reusabilidad, por ejemplo, las características correspondientes a *core assets* están presentes en todas las configuraciones de una línea de productos, presentando una alta reusabilidad [11].

En el caso de la métrica de **grado de implementación del dominio**, se mide el proceso de implementación del dominio en componentes reutilizables (entidad), siendo el atributo el grado al que se ha llevado a cabo dicho proceso. Como se explicó en la Sección 1.1.2, en la fase de implementación del dominio se obtienen componentes reutilizables a partir de las características especificadas en la fase de análisis del dominio. Teniendo como

punto de partida un conjunto total de características a implementar, es posible determinar el número de características implementadas y el número de características faltantes. Esto implica que el proceso mencionado posea un grado de progreso en su ejecución.

Es así como, siguiendo los criterios propuestos por Kitchenham *et al.* [18], se puede afirmar que las métricas propuestas en el presente trabajo están definidas para atributos válidos.

4.1.2 Validez de la unidad

La unidad determina cómo se mide un atributo, esto es, como se mapea un atributo del mundo real al mundo formal o matemático [18]. Un atributo puede ser medido usando diferentes unidades. Por ejemplo, el tamaño de una línea de productos puede ser medido contando el número de características de un modelo de características o el número de variables de un modelo basado en restricciones. Así también, una unidad, puede usarse para medir diferentes atributos.

La unidad de una medida es válida, si ésta es un medio apropiado para medir el atributo en cuestión [18]. Se debe tener en cuenta que cada unidad tomada en la medida de un atributo, debe contribuir de forma equivalente al valor de la medida. Además, las unidades y los tipos de escala deben usarse apropiadamente [18].

En las tres métricas definidas en el presente trabajo la unidad usada es el porcentaje, cuyo tipo de escala es *ratio*. En el caso de la métrica de **porcentaje de configuración de un producto**, éste puede no haber sido empezado a configurar (0%) o estar totalmente configurado (100%), mientras que la configuración progresiva de variantes por cada punto de variación, contribuye al cambio de dicho porcentaje. En la métrica de **grado de reusabilidad de una característica**, una característica puede ser reutilizable en todas las configuraciones de la línea de productos (alcanzando un valor de 100% en la medición) o puede serlo también en menor medida (alcanzando, en cambio un menor porcentaje). Finalmente, para el **grado de implementación del dominio**, el proceso de implementación puede no haber comenzado (0%) o haber ya finalizado (100%), y la implementación de componentes reutilizables aumenta de forma progresiva el valor de la medida.

En conclusión, siguiendo los criterios de Kitchenham *et al.* [18], se puede afirmar que la unidad de porcentaje es válida para las tres métricas propuestas en el presente trabajo.

4.1.3 Validez del instrumento

Un instrumento de medición es aquel que se puede usar para tomar una medida de un atributo dado [18]. Por ejemplo, se puede usar un termómetro para medir la temperatura de un cuerpo, o un modelo de características para medir la variabilidad de una línea de productos. Pueden existir diferentes instrumentos para la medición de un mismo atributo; es así como la variabilidad se puede medir usando un modelo de características, un modelo OVM (u *Orthogonal Variability Model*), entre otros modelos de variabilidad.

Un instrumento de medición es válido cuando cualquier modelo subyacente a éste es válido y el instrumento de medición está calibrado apropiadamente [18]. Si bien es posible definir el instrumento de medición formalmente, para que éste sea válido, basta con corroborar que permite la medición del atributo de la entidad con la unidad establecida y de una forma precisa [18].

En el caso de la métrica del **porcentaje de configuración del producto**, el instrumento usado para la medición es un modelo que use la notación OVM. Esta notación, como la del modelo de características, representa la variabilidad de una línea de productos [1], con la particularidad de que en un modelo OVM, los puntos donde varía la línea de productos se especifican de manera explícita, en los llamados puntos de variación [1]. Esto último hace que un modelo OVM sea apropiado para medir el grado de configuración de un producto respecto a la variabilidad total de una línea de productos.

Por otro lado, las métricas del **grado de reusabilidad de una característica** y del **grado de implementación del dominio** tienen como instrumento el modelo de características. En el primer caso, cada característica del modelo puede o no estar presente en una configuración, lo que implica un grado determinado de reusabilidad dentro de la línea de productos. En el segundo caso, las características del modelo de variabilidad son las que, a la larga, se implementan en componentes reutilizables, lo que permite que el modelo de variabilidad sea útil y preciso para determinar el grado de avance del proceso de implementación del dominio.

En conclusión, los instrumentos usados en las métricas propuestas son válidos. Sin embargo, esto está sujeto a la validez de los modelos en sí (p.e., que el modelo de características usado sea válido), así como a que la información plasmada en estos sea correcta [18].

4.1.4 Validez del protocolo

Los protocolos de medición se refieren a cómo un atributo puede ser medido consistentemente y de manera repetible [18]. Los anteriores aspectos son clave, ya que el proceso de medición debe ser, en lo posible, independiente de la persona que toma la medida y del entorno. Un ejemplo de un protocolo de medición es aquel que se sigue para medir la altura de una persona en metros, y que podría ser: la persona debe estar de pie y recta; la medida debe tomarse desde la parte de arriba de la cabeza; la persona no debe usar zapatos; la persona no debe empinarse.

Un protocolo de medición es válido cuando es adoptado de manera explícita y permite la toma de medidas de forma consistente y repetible [18]. Esto se logra mediante la definición de un protocolo que no sea ambiguo y que evite problemas como doble conteo. Sin embargo, la validación definitiva de un protocolo de medición se logra mediante la aceptación por pares, en lugar de estudios teóricos o empíricos [18].

En las tres métricas expuestas, se define un procedimiento de medición que permite que estas puedan ser aplicadas de forma consistente y repetible, especificando cómo se toma la medición y las condiciones en las que ésta se debe tomar. Si bien esto aporta a la validez de sus respectivos protocolos, no la asegura. En primer lugar, porque como se afirma en esta sección, la validación definitiva del protocolo requiere de su uso y aceptación por pares [18]. En segundo lugar, porque el protocolo depende de la herramienta usada en la gestión de la línea de productos.

4.2 Conclusiones

Siguiendo los criterios propuestos por Kitchenham *et al.* [18] para la validación de métricas en ingeniería de software, podemos concluir que las métricas propuestas en el presente trabajo son válidas en las dimensiones analizadas.

Sin embargo, cabe aclarar, que la validez del instrumento usado en el proceso de medición de cada una de éstas, está sujeta a la validez del modelo subyacente (ya sea un modelo de características o un modelo OVM). También, que la validez del protocolo de medición propuesto en cada uno de los casos está supeditada, en parte, a su implementación correcta en una herramienta de gestión de líneas de productos determinada y a una validación por pares.

5. Conclusiones y trabajo futuro

En los capítulos anteriores se presentó el problema de investigación abordado, su marco conceptual, una caracterización sistemática del área de estudio, la solución propuesta y la validación de la solución.

Para terminar, este capítulo presenta las conclusiones de la investigación y algunos trabajos de investigación futuros.

5.1 Conclusiones

El interés principal del presente trabajo es proponer un *framework* de medición en la ingeniería de líneas de productos. Con este fin, se lleva a cabo un *Systematic Mapping Study* (SMS) que da un panorama general de qué y cómo se mide en las líneas de productos. Posteriormente, se propone el *framework* mencionado, que provee un marco conceptual y unas pautas que contribuyen a un mejor entendimiento y facilitan la aplicabilidad del proceso de medición. Finalmente, se propone y se valida un conjunto de métricas, que ilustran el uso del *framework* de medición.

El análisis sistemático de la literatura arrojó varias conclusiones de interés. En primer lugar, la falta de una validación apropiada de métricas en las líneas de productos pone de manifiesto la necesidad de un acercamiento más riguroso en esta área de investigación. Así también, se debe trabajar más en la construcción de herramientas u otros mecanismos para la automatización del proceso de medición, facilitando su aplicación inmediata dentro de cualquier contexto. Finalmente, la fase de configuración y personalización se evidencia como un tema interesante para trabajo futuro en la medición de líneas de productos, dada la casi total ausencia de métricas que se ocupen de ella.

A continuación se procede a responder las preguntas de investigación presentadas al comienzo de este trabajo:

1. ¿Cómo caracterizar los atributos medibles en una línea de productos?

En el presente trabajo se lleva a cabo un *Systematic Mapping Study* (SMS) [14]. Esta metodología permite hacer de forma sistemática una caracterización, no solo de los atributos medibles, sino también de todos los aspectos relacionados con la medición en la ingeniería de líneas de productos.

2. ¿Cómo definir un *framework* de medición genérico para líneas de productos?

En la literatura se encuentran diferentes enfoques a la hora de elaborar *frameworks* de medición. En el presente trabajo se propuso un *framework* conceptual, que Smyth [52] define como un marco de trabajo estructurado mediante “un conjunto de ideas y teorías que ayudan a un investigador a identificar apropiadamente el problema que se está buscando, a enmarcar sus preguntas y a encontrar una literatura previa apropiada”. El *framework* propuesto comprende un conjunto de conceptos y relaciones que busca facilitar la comprensión y la aplicación de métricas en la ingeniería de líneas de productos.

3. ¿Cómo definir métricas con base en el *framework* anterior?

Con base en el *framework* propuesto, en este trabajo se presentan unas pautas a seguir a la hora de definir una métrica en la ingeniería de líneas de productos. Adicionalmente, se ilustra el uso, tanto del *framework* como de las pautas propuestas, mediante la definición de un conjunto de métricas.

4. ¿Cómo se validan de forma confiable las métricas propuestas anteriormente?

Una métrica puede ser validada mediante una validación empírica y mediante una validación teórica. En la literatura se encuentran diferentes acercamientos para la validación teórica de métricas [18][65], que son usados tanto en la ingeniería de software [64] como en la ingeniería de líneas de productos [11]. En el presente trabajo, las métricas se validan usando el método de validación teórica propuesto por Kitchenham et al. [18].

5.2 Trabajo futuro

Diferentes aspectos quedan pendientes por resolver, en cuanto a la medición en la ingeniería de líneas de productos. Por esta razón se propone que futuras líneas de investigación incluyan los siguientes elementos:

- La validación empírica de métricas. Como se pudo constatar en el *Systematic Mapping Study* (SMS) realizado (ver Capítulo 2), la mayor parte de las métricas propuestas en ingeniería de líneas de productos carecen de validación, ya sea teórica o empírica. Este procedimiento es necesario para corroborar la validez y la aplicabilidad de las métricas. Las métricas definidas con el *framework* propuesto se validaron con una validación teórica, pero quedó como trabajo futuro su validación empírica.
- La automatización de métricas. La mayor parte de las métricas estudiadas, usan como instrumentos de medición modelos que representan diferentes aspectos de las líneas de productos, lo cual facilita la automatización del proceso de medición. Sin embargo, la mayor parte de las métricas estudiadas (ver Capítulo 2) carecen de una propuesta que apunte a su automatización. Este aspecto es importante, ya que la automatización de una métrica facilita su uso en diferentes entornos, tanto académicos como industriales.
- En el SMS realizado dentro del presente trabajo (ver Capítulo 2), se pudo constatar la ausencia de métricas que se ocupen de la fase de configuración y personalización del ciclo de vida de las líneas de productos. Lo anterior, da pertinencia a trabajos que permitan establecer la razón de esta coyuntura, así como a la definición de métricas aplicables a los procesos de esta fase del ciclo de vida.
- Es pertinente la definición de una ontología para la medición en la ingeniería de líneas de productos. Un trabajo de este tipo puede contribuir a reforzar el *framework* propuesto, apuntando no solo a la formalización de su enfoque, sino también a una aplicación más precisa y sin ambigüedades del proceso de medición.

A. Anexo: Lista de artículos seleccionados en el mapeo sistemático de literatura

En la Tabla A-1 se listan los artículos seleccionados en el mapeo sistemático de literatura llevado a cabo en el presente trabajo. Un compendio de datos con todos los resultados extraídos de cada uno de los artículos se puede obtener en el siguiente enlace:

<https://www.dropbox.com/s/lacdhuje11om17/Screening%20of%20Papers.xlsx?dl=0>.

Tabla A-1: Artículos seleccionados en el mapeo sistemático de literatura.

Nombre del Artículo	Año
Assessing the Responsibility of Software Product Line Platform Framework for Business Applications	2013
On the applicability of product variety design concepts to automotive platform commonality	1998
Software performance tuning of software product family architectures: Two case studies in the real-time embedded systems domain	2008
Towards Assessing the Complexity of Object Migration in Dynamic, Feature-oriented Software Product Lines	2013
Feature cohesion in software product lines: an exploratory study	2011
Assessing the maintainability of software product line feature models using structural metrics	2011
Towards indicators of instabilities in software product lines: An empirical evaluation of metrics	2013
Investigating the commonality attributes for scaling product families using comprehensive product platform planning (CP3)	2013
Metrics based variability assessment of code assets	2011
Assessing value in platformed product family design	2001
Analyzing Module Commonality for Platform Design in Functional and Physical Domain	2005
Quantifying the effects of product family decisions on material selection: A process-based costing approach	2009
An Extension of the Commonality Index for Product Family Optimization	2007
Metrics of for the Managing the and Development in Product	2010
Variability management of reliability models in software product lines: An expressiveness and scalability analysis	2012
Empirical validation of complexity and extensibility metrics for software product line architectures	2010
A Case Study of Software Product Line for Business Applications Changeability Prediction	2014
Measuring Non-functional properties in software product lines for product derivation	2008
Extractability Effectiveness on Software Product Line	2014
Quality attributes assessment for feature-based product configuration in software	2010

product line	
A framework for evaluating reusability of core asset in product line engineering	2007
Predicting failure-proneness in an evolving software product line	2013
Systematic evaluation of software product line architectures	2013
Scalable prediction of non-functional properties in software product lines: Footprint and memory consumption	2013
Family-based performance measurement	2014
Measuring Complexity of Domain Models Represented by Feature Diagrams	2009
A ReliefF attribute weighting and X-means clustering methodology for top-down product family optimization	2010
Calculating and Modeling Common Parts of Software Product Lines	2008
Variability-aware performance prediction: A statistical learning approach	2013
Evaluating flexibility in embedded automotive product lines using real options	2008
Injecting quality attributes into software architectures with the common variability language	2014
A Mutual Information-Based Hybrid Feature Selection Method for Software Cost Estimation Using Feature Clustering	2014
Towards the Integration of Quality Attributes into a Software Product Line Cost Model	2011
Measuring the structural complexity of feature models	2013
On the Modularity of Software Architectures: A Concern-Driven Measurement Framework	2007
Metrics-Guided Quality Management for Component-Based Software Systems	2001
Identification and Collection of Software Metrics for CBSs	
Determining the Variation Degree of Feature Models	2005
Quality prediction and assessment for product lines	2003
Experimental use of code delta, code churn, and rate of change to understand software product line evolution	2007
Calculating ROI for Software Product Lines	2004
Quality function deployment planning for platform design	2008
Flexibility valuation of product family architecture: A real-option approach	2006
Integration of marketing research techniques into house of quality and product family design	2009
An approach to developing domain requirements as a core asset based on commonality and variability analysis in a product line	2005
A software fault tree key node metric	2007
Improving the management of product lines by performing domain knowledge extraction and cross product line analysis	2015
Towards system analysis with variability model metrics	2013
A Cost Model for Software Product Lines	2004
Measuring Product Line Architectures	2001
Control variant-rich models by variability measures	2011
Quantifying maintainability in feature oriented product lines	2008
A Metric Suite to Support Software Product Line Architecture Evaluation	2008
A software product line life cycle cost estimation model	2004

Improving the accuracy of COPLIMO to estimate the payoff of a software product line	2012
A quality-based cost estimation model for the product line life cycle	2006
Tracking degradation in software product lines through measurement of design rule violations	2002
Some metrics for accessing quality of product line architecture	2008
Goal-Oriented Assessment of Product-Line Domains	2003
Using service utilization metrics to assess the structure of product line architectures	2003
Measurement of the complexity of variation points in software product lines	2009
Assessing Merge Potential of Existing Engine Control Systems into a Product Line	2006
Measuring Shape Commonality	2006

Referencias

- [1] K. Pohl, G. Böckle, and F. Van Der Linden, *Software Product Line Engineering. Foundations, Principles, and Techniques*, vol. 49, no. 12. 2005.
- [2] T. DeMarco, *Controlling Software Projects: Management, Measurement, and Estimates*. Prentice Hall PTR, 1986.
- [3] S. Montagud, S. Abrahão, and E. Insfran, "A systematic review of quality attributes and measures for software product lines," *Softw. Qual. J.*, vol. 20, no. 3–4, pp. 425–486, 2012.
- [4] F. García, M. F. Bertoa, C. Calero, A. Vallecillo, F. Ruíz, M. Piattini, and M. Genero, "Towards a consistent terminology for software measurement," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 48, no. 8, pp. 631–644, 2006.
- [5] J. C. F. G. I. M. Jcgm, "JCGM 200 : 2008 International vocabulary of metrology — Basic and general concepts and associated terms (VIM) Vocabulaire international de métrologie — Concepts fondamentaux et généraux et termes associés (VIM)," *Int. Organ. Stand. Geneva ISBN*, vol. 3, no. Vim, p. 104, 2008.
- [6] H. Zuse, *A Framework of Software Measurement*. Walter de Gruyter & Co., 1997.
- [7] V. Štuikys and R. Damaševičius, "Measuring Complexity of Domain Models Represented by Feature Diagrams," *Inf. Technol. Control*, vol. 38, no. 3, pp. 179–187, 2009.
- [8] R. Heradio, D. Fernandez-Amoros, L. Torre-Cubillo, and A. Perez Garcia-Plaza, "Improving the accuracy of COPLIMO to estimate the payoff of a software product line," *Expert Syst. Appl.*, vol. 39, no. 9, pp. 7919–7928, 2012.
- [9] T. W. Simpson, Z. Siddique, and J. R. Jiao, Eds., *Product Platform and Product Family Design*. Boston, MA: Springer US, 2006.
- [10] C. Sant'Anna, E. Figueiredo, A. Garcia, and C. J. P. Lucena, "On the Modularity of Software Architectures: A Concern-Driven Measurement Framework," *Softw. Archit.*, no. 4758, pp. 207–224, 2007.
- [11] J. S. Her, J. H. Kim, S. H. Oh, S. Y. Rhew, and S. D. Kim, "A framework for evaluating reusability of core asset in product line engineering," *Inf. Softw. Technol.*, vol. 49, no. 7, pp. 740–760, 2007.
- [12] C. Del Rosso, "Software performance tuning of software product family architectures: Two case studies in the real-time embedded systems domain," *J. Syst. Softw.*, vol. 81, no. 1, pp. 1–19, 2008.
- [13] B. B. P. . Cafeo, F. . B. Dantas, E. J. R. . Cirilo, and A. . Garcia, "Towards indicators of instabilities in software product lines: An empirical evaluation of

- metrics,” in *International Workshop on Emerging Trends in Software Metrics, WETSoM*, 2013, pp. 69–75.
- [14] K. Petersen, R. Feldt, S. Mujtaba, and M. Mattsson, “Systematic mapping studies in software engineering,” in *EASE’08 Proceedings of the 12th international conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering*, 2008, pp. 68–77.
- [15] B. Kitchenham and S. Charters, “Guidelines for performing Systematic Literature Reviews in Software Engineering,” *Engineering*, vol. 2, p. 1051, 2007.
- [16] R. B. Fuller and J. McHale, *World Design Science Decade, 1965-1975: Five Two-year Phases of a World Retooling Design Proposed to the International Union of Architects for Adoption by World Architectural Schools, Volumes 3-6*. World Resources Inventory, 1965.
- [17] A. R. Hevner, S. T. March, J. Park, and S. Ram, “Design Science in Information Systems Research,” *MIS Quarterly*, vol. 28, no. 1, pp. 75–105, 2004.
- [18] B. Kitchenham, S. L. Pfleeger, and N. Fenton, “Towards a framework for software measurement validation,” *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 21, no. 12, 1995.
- [19] IEEE Computer Society, “IEEE Standard for a Software Quality Metrics Methodology - IEEE Std 1061™-1998 (R2009),” vol. 1998, 2009.
- [20] A. N. Nambiar, “Mass Customization : Where do we go from here ?,” *Proc. World Congr. Eng. 2009*, vol. I, 2009.
- [21] M. H. Meyer and A. P. Lehnerd, “The power of product platforms - building value and cost leadership - meyer,mh, lehnerd,ap,” *J. Prod. Innov. Manag.*, vol. 14, pp. 526–529, 1997.
- [22] P. Clements and L. Northrop, *Software Product Lines: Practices and Patterns*. 2001.
- [23] J. Bosch, *Design and Use of Software Architectures: Adopting and Evolving a Product-Line Approach*. 2000.
- [24] K. Schmid and M. Verlage, “The economic impact of product line adoption and evolution,” *IEEE Softw.*, vol. 19, no. 4, 2002.
- [25] S. Apel, D. Batory, C. Kästner, and G. Saake, *Feature-Oriented Software Product Lines: Concepts and Implementation*. 2013.
- [26] K. Czarnecki, “Generative Programming: Principles and Techniques of Software Engineering Based on Automated Configuration and Fragment-Based Component Models,” 1998.
- [27] M. A. Ould, C. Unwin, and B. C. S. W. G. on Testing, *Testing in Software Development*. 1986.
- [28] R. Mazo, “A Generic Approach for Automated Verification of Product Line Models,” 2011.
- [29] “IEEE P1490/D1, May 2011,” *IEEE P1490/D1, May 2011*. pp. 1–505, 2011.
- [30] K. C. Kang, S. G. Cohen, J. a Hess, W. E. Novak, and a S. Peterson, “Feature-

- Oriented Domain Analysis (FODA) Feasibility Study,” *Distribution*, vol. 17, no. November, p. 161, 1990.
- [31] R. Mazo, C. Salinesi, D. Diaz, O. Djebbi, and A. Michiels, “Constraints: the Heart of Domain and Application Engineering in the Product Lines Engineering Strategy,” *Int. J. Inf. Syst. Model. Des. IJISMD*, vol. 3, no. 2, pp. 33–68, 2011.
- [32] AHD, “The American Heritage Dictionary of the English Language. Free Online Dictionary, Thesaurus and Encyclopedia.,” *Online*, 2013. [Online]. Available: <http://www.thefreedictionary.com/>.
- [33] K. Czarnecki, S. Helsen, and U. Eisenecker, “Formalizing cardinality-based feature models and their specialization,” *Softw. Process Improv. Pract.*, vol. 10, no. 1, pp. 7–29, 2005.
- [34] D. Dhungana, P. Grünbacher, and R. Rabiser, “The DOPLER meta-tool for decision-oriented variability modeling: A multiple case study,” *Autom. Softw. Eng.*, vol. 18, no. 1, pp. 77–114, 2011.
- [35] N. E. Fenton and S. L. Pfleeger, *Software Metrics: A Rigorous and Practical Approach*, vol. 2. 1997.
- [36] C. Ebert, “Correspondence visualization techniques for analyzing and evaluating software measures,” *IEEE Trans. Softw. Eng.*, 1992.
- [37] L. Briand, K. El Emam, and S. Morasca, “On the application of measurement theory in software engineering,” *Empir. Softw. Eng.*, vol. 1, no. 1, pp. 61–88, 1996.
- [38] (ISO) International Organization for Standardization, *ISO/IEC 15939, Systems and Software Engineering - Measurement Process*, vol. 2007, no. January. 2007.
- [39] ISO/IEC 14598-1, “Information Technology - Software Product Evaluation,” 1999.
- [40] IEEE, “IEEE Standard Glossary of Software Engineering Terminology,” *Office*, vol. 121990, no. 1, p. 1, 1990.
- [41] C. Wohlin, P. Runeson, M. Höst, M. C. Ohlsson, B. Regnell, and A. Wesslén, *Experimentation in Software Engineering*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2012.
- [42] N. Fenton, “Software measurement. A necessary scientific basis,” *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 20, no. 3, pp. 199–206, 1994.
- [43] A. Souag, R. Mazo, C. Salinesi, and I. Comyn-Wattiau, “Reusable knowledge in security requirements engineering: a systematic mapping study,” *Requir. Eng.*, Feb. 2015.
- [44] B. Kitchenham, “What’s up with software metrics? - A preliminary mapping study,” *J. Syst. Softw.*, vol. 83, no. 1, pp. 37–51, 2010.
- [45] D. Benavides, P. Trinidad, and A. Ruiz-Cortés, “Automated Reasoning on Feature Models,” in *LNCS Advanced Information Systems Engineering 17th International Conference CAiSE 2005*, 2005, vol. 01, pp. 491–503.
- [46] R. Wieringa, N. Maiden, N. Mead, and C. Rolland, “Requirements engineering paper classification and evaluation criteria: A proposal and a discussion,” *Requir.*

- Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 102–107, 2006.
- [47] H. Zhang, M. A. Babar, and P. Tell, “Identifying relevant studies in software engineering,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 53, no. 6, pp. 625–637, Jun. 2011.
- [48] C. Wohlin, “Guidelines for snowballing in systematic literature studies and a replication in software engineering,” in *Proceedings of the 18th International Conference on Evaluation and Assessment in Software Engineering - EASE '14*, 2014, pp. 1–10.
- [49] E. Engström and P. Runeson, “Software product line testing: systematic mapping study,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 2–13, 2011.
- [50] P. A. Da Mota Silveira Neto, I. Do Carmo MacHado, J. D. McGregor, E. S. De Almeida, and S. R. De Lemos Meira, “A systematic mapping study of software product lines testing,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 53, no. 5, pp. 407–423, 2011.
- [51] L. Chen and M. Ali Babar, “A systematic review of evaluation of variability management approaches in software product lines,” *Inf. Softw. Technol.*, vol. 53, no. 4, pp. 344–362, 2011.
- [52] R. Smyth, “Exploring the Usefulness of a Conceptual Framework as a Research Tool: A Researcher’s Reflections.,” *Issues Educ. Res.*, vol. 14, no. 2, pp. 167–180, Nov. 2003.
- [53] V. R. Basili, “Software modeling and measurement: the Goal/Question/Metric paradigm,” *Quality*. p. 24, 1992.
- [54] F. S. Roberts, “Measurement Theory,” 1985.
- [55] S. Purao and V. Vaishnavi, “Product metrics for object-oriented systems,” *ACM Comput. Surv.*, vol. 35, no. 2, pp. 191–221, 2003.
- [56] N. Habra, A. Abran, M. Lopez, and A. Sellami, “A framework for the design and verification of software measurement methods,” *J. Syst. Softw.*, vol. 81, no. 5, pp. 633–648, 2008.
- [57] T. von der Maßen and H. Lichter, “Determining the Variation Degree of Feature Models,” in *Software Product Lines*, 2005, pp. 82–88.
- [58] A. Fuggetta, L. Lavazza, S. Morasca, S. Cinti, G. Oldano, and E. Orazi, “Applying GQM in an industrial software factory,” *ACM Trans. Softw. Eng. Methodol.*, vol. 7, no. 4, pp. 411–448, 1998.
- [59] R. van Solingen and E. Berghout, “Integrating goal-oriented measurement in industrial software engineering: industrial experiences with and additions to the Goal/Question/Metric method (GQM),” in *Proceedings Seventh International Software Metrics Symposium*, 2001, pp. 246–258.
- [60] P. Berander and P. Jönsson, “A goal question metric based approach for efficient measurement framework definition,” in *Proceedings of the 2006 ACM/IEEE international symposium on International symposium on empirical software engineering - ISESE '06*, 2006, p. 316.
- [61] M. G. Mendonca and V. R. Basili, “Validation of an approach for improving existing measurement frameworks,” *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 26, no. 6, pp. 484–499,

2000.

- [62] L. Briand, S. Morasca, and V. Basili, "An operational process for goal-driven definition of measures," *IEEE Trans. Softw. Eng.* 28, vol. 28, no. 12, pp. 1106–1125, 2002.
- [63] R. Mazo, J. Muñoz-Fernández, L. Rincón, C. Salinesi, and G. Tamura, "VariaMos: an extensible tool for engineering (dynamic) product lines," *19th Int. Softw. Prod. Line Conf.*, pp. 1–6, 2015.
- [64] A. Sarkar and N. C. Debnath, "Measuring Complexity of Multi-Agent System Architecture," *2012 10th IEEE Int. Conf. Ind. Informatics*, pp. 998–1003, 2012.
- [65] L. C. Briand, S. Morasca, and V. R. Basili, "Property-based software engineering measurement," *IEEE Trans. Softw. Eng.*, vol. 22, no. 1, pp. 68–86, 1996.