

**MODELO DE EVOLUCIÓN DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN
LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN
(SLC-EModel)**

Sandra Liliana Cano Moya



Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos
por la Universidad del Valle para la obtención del grado de Doctora en Ingeniería

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI, JUNIO 10 DE 2019**

**MODELO DE EVOLUCIÓN DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN
LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN
(SLC-EModel)**

Copyright 2019

Por

Sandra Liliana Cano Moya



Director de investigación

Ing. Leonardo Rivera Cadavid, Ph.D.
Universidad del Valle

Codirector de investigación

Ing. Jorge Luis García Alcaraz, Ph.D.
Universidad Autónoma de Ciudad Juárez

Asesor de investigación

Arq. Luis Fernando Botero Botero, M.Sc.
Universidad Eafit

**UNIVERSIDAD DEL VALLE
ESCUELA DE INGENIERÍA INDUSTRIAL
DOCTORADO EN INGENIERÍA
ÉNFASIS EN INGENIERÍA INDUSTRIAL
SANTIAGO DE CALI, JUNIO 10 DE 2019**

CALIFICACIÓN

El director de investigación se permite informar que la candidata a Doctorado en Ingeniería, en el Énfasis en Ingeniería Industrial, Ing. Sandra Liliana Cano Moya, M.Sc. presentó para evaluación la tesis doctoral de su autoría titulada **“Modelo de Evolución de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-EModel)”**, como requisito parcial definido por la Universidad del Valle para su titulación como Doctora en Ingeniería, Con Énfasis en Ingeniería Industrial.

Esta tesis fue evaluada por los doctores Tulio Gerardo Motoa de la Universidad Santiago de Cali, José Luis Salvatierra de la Pontificia Universidad de Católica de Chile y Holmes Páez Martínez de la Pontificia Universidad de Javeriana, quienes después de asistir a la defensa pública de su investigación, el día 10 del mes de junio de 2019 en el Salón 1002 de la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad del Valle, y de escuchar las respuestas a las preguntas formuladas, APRUEBAN por unanimidad.

Esta APROBACIÓN consta en el Acta de Sustentación dada en Santiago de Cali, a los diez (10) días del mes de junio de 2019.



Profesor Leonardo Rivera Cadavid, Ph.D.

Coordinador de Posgrados
Escuela de Ingeniería Industrial
Universidad del Valle

**A Valentina y Brayan,
por tanto, por todo y por más.
Gracias por acompañarme en este viaje.**

RECONOCIMIENTOS Y AGRADECIMIENTOS

La decisión de adelantar el doctorado ha sido una tarea solitaria que me ha llevado por caminos no andados anteriormente, y de no ser por las orientaciones de mi director y la compañía de familiares y amigos, hubiese sido una carga mucho más pesada. Esta tesis ha sido un esfuerzo personal, sin embargo, he contado con personas que contribuyeron, influyeron y acompañaron los momentos de su realización de muchas maneras. Por esto, por tanto, por todo y por más, deseo expresarles mi agradecimiento. De manera especial a aquellos que fueron más cercanos a este esfuerzo.

A Harold Cárdenas, más que mi profesor y compañero de trabajo, mi amigo, al que respeto y quiero mucho, es la persona que después de mi familia ha creído incondicionalmente en mí y me ha apoyado permanentemente en la universidad desde que fuera mi director del trabajo de grado en pregrado. A Armando Orobio y al mismo Harold, por llevar mi carga académica mientras estudiaba, esto me permitió ir y volver.

A los profesores Leonardo Rivera Cadavid y Jorge Luis García Alcaraz, mis directores de investigación, por estar siempre con ideas y desafíos valiosos, y más que eso, porque tuvieron la paciencia para escucharme en esos momentos en que todo pesaba más. Al profesor Luis Fernando Botero, por su asesoría constante y por acogerme un año en la Universidad Eafit, este fue un tiempo maravilloso para aprender sobre mi trabajo y una experiencia muy especial para la vida.

Al profesor Oscar Rubiano, quien me presentó a Lean Construction y me acompañó en la primera parte de mi doctorado cuando necesité definir mi tema de investigación. Al profesor José Rafael Tovar, quien se dispuso a apoyarme incondicionalmente con su conocimiento, y por su intermedio a Juan Díaz, su estudiante de la Maestría en Estadística, que me ayudó con un tema específico del cual no tenía experticia. A la profesora Ana Valdés, quien con sus críticas muy precisas me ayudó a ver y lograr un mejor proceso.

A los profesores Luis Fernando Alarcón, Carlos Torres Formoso y Xavier Briosio, por su apoyo al recibirme en las pasantías de investigación en los grupos de investigación que dirigen, una oportunidad de aprendizaje invaluable.

A mis amigas María Isabel Romero y Rosané Moraes, por su apoyo incondicional durante mis estancias en Santiago de Chile y Porto Alegre, respectivamente.

A la Alianza del Pacífico y a los Gobiernos de Chile y Perú, por la asignación de las becas para la realización de mis pasantías de investigación en 2014 en la Pontificia Universidad Católica de Chile y en la Universidad Pontificia Católica de Perú en 2016.

A las universidades que me acogieron para la realización de mis pasantías de investigación, a la Universidad Eafit en 2014, a la Universidad Católica de Chile en 2014 y en 2016, a la Universidad Federal Rio Grande Do Sul en 2016 y a la Universidad Pontificia Católica de Perú en 2016.

A la Escuela de Ingeniería Industrial, por acogerme como su estudiante, y a la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática, de donde soy docente, por su apoyo para la realización de mi doctorado.

A los jurados, profesor Tulio Gerardo Motoa, José Luis Salvatierra y Holmes Paéz, mis agradecimientos por su evaluación y con esta, la oportunidad de enriquecer mi proceso de formación como doctora en ingeniería.

Mi mayor agradecimiento a la Universidad del Valle por el apoyo proporcionado al concederme la Comisión de Estudios.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	18
ESTRUCTURA DE LA TESIS	21
1. FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	23
Resumen	23
1.1 Introducción	24
1.2 Motivación	25
1.3 El problema de investigación	25
1.4 Exploración y definición del tema de investigación	28
1.5 Preguntas de investigación	29
1.6 Propósito de la investigación	30
1.7 Objetivos de investigación	30
1.7.1 Objetivo general	30
1.7.2 Objetivos específicos	30
1.8 Contribución al conocimiento	31
1.8.1 Contribución teórica	31
1.8.2 Contribución práctica	32
1.8.3 Contribución metodológica	33
1.9 Originalidad de la investigación	34
1.10 Metodología del estudio	34
1.10.1 Actividades metodológicas del primer objetivo específico	36
1.10.2 Actividades metodológicas del segundo objetivo específico	37
1.10.3 Actividades metodológicas del tercer objetivo específico	39
1.11 El Modelo de Evolución de la Madurez como un artefacto según el Design Science Research (DSR)	40
1.12 La construcción de artefactos	41
1.13 Puntos clave de la sección	42
2. LEAN EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN	43
Resumen	43

2.1 Integración de Lean en la producción de proyectos de construcción	44
2.1.1 Mejoramiento de la productividad del proyecto de construcción a partir del mejoramiento de la gestión de la producción	46
2.1.2 Integración de Lean en el sector de la construcción	48
2.1.3 El Sistema de Producción Toyota (TPS)	48
2.1.4 Lean Manufacturing	51
2.1.5 Lean en la construcción	53
2.1.6 Lean Construction	54
2.1.7 Definición de Lean Construction	57
2.1.8 Triángulo del sistema de producción LC	58
2.1.8.1 Principios – Los principios que movilizan la producción	60
2.1.8.2 Cultura - Desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas con enfoque en el cliente	64
2.1.8.3 Tecnología - Utilización e innovación en el uso de la tecnología para la gestión y mejoramiento de la producción	66
2.1.9 Enfoque sistémico de Lean Construction	67
2.1.10 ¿Qué es una Gestión Lean de Producción de Proyectos de Construcción?	68
2.1.11 El Sistema de Producción de Proyectos de Construcción: flujo secuencial de actividades acompasado por la unidad de producción	69
2.1.12 Puntos clave de la sección	73
2.2 Evaluación del desempeño de Lean Construction	73
2.2.1 Trabajos relacionados	73
2.2.2 Resultados – Extracción de la información	75
2.2.2.1 Identificación de herramientas para evaluar LC	75
2.2.2.2 Identificación de otras herramientas o artefactos que potencialmente sean utilizados en la evaluación de otros aspectos de la implementación de LC	77
2.2.2.3 Relación de las metodologías de investigación utilizadas en el desarrollo de iniciativas de evaluación de LC	78
2.2.2.4 Identificar en la literatura la existencia de iniciativas estándar para dirigir la evolución de la madurez de LC a través de niveles de madurez	78
2.2.3 Implicaciones de la investigación	79
2.2.4 Limitaciones del estudio de evaluación del desempeño de Lean Construction	80
2.2.5 Puntos clave de la sección	80
3. LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN	81
Resumen	81
3.1 Implementación de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	82
3.1.1 Componentes del Sistema de Producción de Proyectos de Construcción	83

3.1.2 Implementar Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	84
3.1.3 Diferencias en la implementación de Lean en la organización y en el proyecto de construcción	87
3.1.4 ¿Cómo debe ser una implementación efectiva de Lean en la Gestión de producción de proyectos de construcción?	89
3.1.5 Mejoramiento del Sistema de Producción de Proyectos de Construcción con la implementación de LC	95
3.1.6 Puntos clave de la sección	96
3.2 La madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	97
3.2.1 El concepto de madurez	97
3.2.2 Evaluar la madurez	98
3.2.3 La madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	99
3.2.4 Integración de las fases del proyecto	100
3.2.5 Categorías de madurez	104
3.2.5.1 Personas	104
3.2.5.2 Sistema de Producción	106
3.2.5.3 Soporte Organizacional a la Producción del Proyecto	108
3.2.6 Indicadores de madurez	111
3.2.7 Modelos de Madurez como herramientas de mejoramiento	113
3.2.8 El Modelo de Madurez	114
3.2.8.1 ¿Qué evalúa el Modelo de Madurez?	115
3.2.9 Evaluar la madurez, un proceso organizacional participativo	116
3.2.10 Definición del Modelo de Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	116
3.2.11 Niveles de madurez del Modelo de Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	117
3.2.12 Niveles de madurez de Modelos de Madurez de Referencia	117
3.2.13 Identificación del estado de madurez de la Gestión de producción de proyectos de construcción antes de LC	119
3.2.14 Niveles de madurez del SLC-MM	120
3.2.15 Calificación de la madurez de los atributos en el modelo	122
3.2.16 Evaluar el subnivel de madurez de los atributos	123
3.2.17 Estrategia de evolución de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	123
3.2.18 Puntos clave de la sección	124
4. IDENTIFICACIÓN DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN	125

Resumen	125
4.1 Identificación de los elementos asociados con la madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	125
4.1.1. Identificación de los elementos de las categorías de madurez	126
4.1.2 Categoría Personas	128
4.1.3 Categoría Sistema de Producción de Proyectos de Construcción	129
4.1.4 Categoría Soporte de la Organización al Proceso de Producción de Proyectos de Construcción	130
4.2 Modelo de Ecuaciones Estructurales Aplicado a la Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	131
4.2.1 Métodos para analizar la información obtenida para el estudio de las relaciones entre elementos de madurez de LC en la GPC	132
4.2.2 Modelos de Ecuaciones Estructurales	134
4.2.3 El proceso de construcción del Modelo de Ecuaciones Estructurales	137
4.2.3.1 Recolección de información	137
4.2.3.2 Validación racional	138
4.2.3.3 Validación estadística de la información recolectada en la encuesta	139
4.2.3.4 Valores perdidos y valores fuera del rango	139
4.2.3.5 Selección de atributos para conformar los factores de madurez	139
4.2.4 Construcción del Modelo de Ecuaciones Estructurales	142
4.2.4.1 Especificación del modelo	143
4.2.4.2 Creación del Modelo en Ecuaciones Estructurales (SEM)	145
4.2.4.3 Estimación de parámetros del modelo	145
4.2.4.4 Identificación del modelo	146
4.2.4.5 Evaluación del ajuste del modelo – Prueba de robustez	148
4.2.5 Determinación de las ecuaciones estructurales	153
4.2.6 Expresión matricial de las ecuaciones estructurales del modelo	154
4.2.6.1 Modelo Estructural	154
4.2.6.2 Matrices de ecuaciones para el Modelo Estructural	155
4.2.6.3 Modelo de Medida	155
4.2.6.4 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM exógeno - CommTM	156
4.2.6.5 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - LeaderSh	156
4.2.6.6 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - SupporOp	156
4.2.6.7 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - TeamWork	157
4.2.6.8 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - WorkEnv	157

4.2.6.9 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno – SPImprov	157
4.2.6.10 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - ProImpr	157
4.2.7 Ensamble de las ecuaciones estructurales en notación LISREL	157
4.2.8 Puntos clave de la sección	158
4.3 Identificación de las relaciones de madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	158
4.3.1 Construcción de los factores de madurez	159
4.3.1.1 Relaciones entre los atributos y los factores de madurez	159
4.3.1.2 Ecuaciones estructurales de los atributos y el factor de madurez asociado	161
4.3.2 Relaciones directas entre los factores de madurez	161
4.3.2.1 Relaciones directas y tamaño de los efectos	162
4.3.2.2 Ensamble de las ecuaciones estructurales para efectos directos	163
4.3.2.3 Tamaño de los efectos directos para los factores de madurez	164
4.3.3 Relaciones indirectas entre los factores de madurez	166
4.3.3.1 Efectos indirectos para rutas de dos segmentos y tamaño de los efectos	166
4.3.3.2 Efectos indirectos para rutas de tres segmentos y tamaño de los efectos	167
4.3.3.3 Efectos indirectos para rutas de cuatro segmentos y tamaño de los efectos	168
4.3.3.4 Efectos indirectos para rutas de cinco segmentos y tamaño de los efectos	169
4.3.3.5 Efectos indirectos para rutas de seis segmentos y tamaño de los efectos	170
4.3.4 Efectos totales y tamaño de los efectos	170
4.3.4.1 Efectos indirectos pequeños	172
4.3.4.2 Efectos indirectos medianos	172
4.3.4.3 Efectos indirectos grandes	172
4.3.5 Efectos moderadores	172
4.3.6 Puntos clave de la sección	172
5. MODELO DE EVOLUCIÓN DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN SLC-EModel	174
Resumen	174
5.1 Estructura del Modelo de Evolución de Madurez de Lean Construction en la Gestión de Proyectos de Construcción (SLC-EModel)	175
5.2 Modelo de Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-MM)	176
5.2.1 Modelos de ecuaciones estructurales de segundo orden	177
5.2.2 Validación del modelo de segundo orden	180
5.2.3 Herramienta de Calificación de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de Producción Proyectos de Construcción (SLC-QT)	181
5.2.3.1 Cálculo de los índices locales de madurez (ILM)	181

5.2.3.2 Índices locales de madurez (ILM _i)	182
5.2.3.3 Cálculo del índice global de madurez (IGM)	188
5.2.3.4 Ajuste del índice por escala	189
5.2.4 Perfiles de madurez	191
5.2.4.1 Perfil de referencia del nivel de madurez 1	191
5.2.4.2 Perfiles de referencia de los niveles de madurez del 2 al 5	192
5.2.5 Herramienta de Evaluación de la Madurez de los Atributos de LC en la GPC (SLC-MAET)	193
5.2.6 Ejemplo de aplicación del Modelo de Madurez (SLC-MM)	194
5.2.7 Puntos clave de la sección	200
5.3 Estrategia de Evolución de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-ES)	201
5.3.1 Definición de los resultados esperados con la evolución de LC en la GPC y análisis de beneficios	201
5.3.2 Estrategia de Evolución de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	202
5.3.3 Equipos para el proceso de evolución de la madurez de LC en la GPC	204
5.3.4 Aplicación del Modelo de Evolución de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción	207
5.3.4.1 Primera fase de aplicación del SLC-EModel	207
5.3.4.2 Segunda fase de aplicación del SLC-EModel	207
5.3.4.3 Tercera fase de aplicación del SLC-EModel	216
5.3.5 Puntos clave de la sección	219
CONCLUSIONES	220
RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA USAR EL SLC-EMODEL	232
TRABAJOS FUTUROS	234
PRODUCCIÓN ACÁDEMICA	237
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	240
ANEXOS	260

LISTA DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1.1	Preguntas que conducen la investigación	Pág. 28
-----------	---	------------

Capítulo 2

Tabla 2.1	Principio 1 del TPS	47
Tabla 2.2	Principios 2 al 8 del TPS	48
Tabla 2.3	Principios 9 al 11 del TPS	49
Tabla 2.4	Principios 12 al 14 del TPS	49
Tabla 2.5	Principios Lean Manufacturing	50
Tabla 2.6	Principios LC asociados con el Mejoramiento del Sistema de Producción	60
Tabla 2.7	Principios LC asociados con el Mejoramiento de la Producción	61
Tabla 2.8	Otros principios propuestos para ser considerados en LC	62
Tabla 2.9	Iniciativas de evaluación de Lean Construction	73

Capítulo 3

Tabla 3.1	Indicadores de madurez y forma de medición	112
Tabla 3.2	Niveles de madurez definidos para cinco modelos de madurez	119

Capítulo 4

Tabla 4.1	Categoría Personas: factores y atributos	126
Tabla 4.2	Categoría Sistema de Producción: Factores y Atributos	127
Tabla 4.3	Categoría Soporte de la Organización al Proceso de Producción de Proyectos de Construcción: factores y atributos	128
Tabla 4.4	Estadísticos del SEM. <i>Software</i> WarpPLS 6.0. Coeficientes de los factores de madurez	146
Tabla 4.5	Resultados del desempeño del SEM (Archivo de datos: EModel 111 VAR - Robust Path - V1.prj)	147
Tabla 4.6	Cargas factoriales del FM (TeamWork)	158
Tabla 4.7	Coeficientes de ruta β_{ji} . Efecto directo	160
Tabla 4.8	Tamaño de los efectos directos	163
Tabla 4.9	Efectos indirectos de dos segmentos	164

Tabla 4.10	Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos	165
Tabla 4.11	Efectos indirectos de tres segmentos	165
Tabla 4.12	Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos	166
Tabla 4.13	Efectos indirectos de cuatro segmentos	166
Tabla 4.14	Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos	167
Tabla 4.15	Efectos indirectos de cinco segmentos	167
Tabla 4.16	Tamaño de los efectos indirectos de cinco segmentos	168
Tabla 4.17	Resumen de los efectos en el modelo	168

Capítulo 5

Tabla 5.1	Estructura general del SLC-EModel	173
Tabla 5.2	Cargas factoriales de los factores de madurez que componen el índice global de madurez	176
Tabla 5.3	Cargas factoriales de los factores de madurez que componen el índice global de madurez (IGM)	186
Tabla 5.4	Índices locales de madurez de referencia para niveles de madurez entre 1 y 5	187
Tabla 5.5	Resultados de evaluación en campo de LC en la GPC (ejemplo)	192
Tabla 5.6	Índices locales de madurez de LC en la GPC (ejemplo)	193
Tabla 5.7	IGM de LC en la GPC. Resultado del ejemplo	197
Tabla 5.8	Responsabilidades de los equipos del proceso de evolución de LC en la GPC	203
Tabla 5.9	Definición del índice global de madurez objetivo (IGMe)	210
Tabla 5.10	Índice global de madurez objetivo (IGMe) obtenido de la selección con el SLC-SM MAET	212
Tabla 5.11	Comparación entre el IGM de la evaluación 1,33 y el IGMe para la evolución al nivel 2,00	212

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1	Esquema de objetivos y actividades para la investigación	34
------------	--	----

Capítulo 2

Figura 2.1	Definición de LC como un Sistema de Gestión de la Producción de Proyectos de Construcción	56
Figura 2.2	Triángulo del Sistema de Producción LC. Esquema de interacción de los elementos del Sistema de Producción Lean Construction	57
Figura 2.3	Matriz de Producto – Proceso	69
Figura 2.4	Estrategias de producción y su relación con los puntos de penetración del pedido (OPP)	70

Capítulo 3

Figura 3.1	Proceso propuesto de implementación de LC	83
Figura 3.2	Relaciones entre las fases del proyecto. Basado en el Lean Project Delivery System (LPDS)	98
Figura 3.3	Interacción entre las fases del proyecto. I. Definición del proyecto; II. Planificación de construcción; III. Construcción	99
Figura 3.4	Interacción entre las fases del proyecto; IV. Puesta en funcionamiento; V. Mantenimiento. VI. Sostenibilidad y posterior finalización de la vida útil	100
Figura 3.5	Estrategia de evolución de LC en la GPC	120

Capítulo 4

Figura 4.1	Estructura del SLC-EModel	125
Figura 4.2	Modelo de Medida u <i>Outer Model</i>	134
Figura 4.3	Modelo Estructural o <i>Inner Model</i>	134
Figura 4.4	Atributos asociados a los factores de madurez (FM)	140
Figura 4.5	Relaciones propuestas entre los factores de madurez (FM). Modelo empírico	141
Figura 4.6	Modelo de Ecuaciones Estructurales para la Madurez de LC en la GP	149

Figura 4.7	Ruta crítica de efectos del modelo. La ruta más influyente	163
------------	--	-----

Capítulo 5

Figura 5.1	Esquema general de la construcción del IGM	176
Figura 5.2	Indicadores de ajuste del SEM de segundo orden	178
Figura 5.3	Perfil de referencia nivel de madurez 1 de LC en la GPC	189
Figura 5.4	Perfiles de referencia nivel de madurez del 1 al 5 de LC en la GPC	190
Figura 5.5a	Perfiles de madurez de los FM de la categoría Personas	194
Figura 5.5b	Perfiles de madurez de los atributos de la categoría Sistema de Producción	194
Figura 5.5c	Perfiles de madurez de los atributos de la categoría Soporte de la Organización al Proceso de Producción	195
Figura 5.6	Perfil de madurez obtenido para la evaluación de madurez del ejemplo	196
Figura 5.7	Esquema de la aplicación de los componentes del SLC-EModel para la definición e implementación de la estrategia de evolución	200
Figura 5.8	Relaciones entre los equipos y la Alta Dirección para la aplicación del SLC-EModel	203
Figura 5.9	Jerarquía de agrupación de los elementos del SLC-EModel	204
Figura 5.10	Primera fase de aplicación del SLC-EModel. Evaluación de la madurez con SLC-MM	205
Figura 5.11	Segunda fase de aplicación del SLC-EModel	208
Figura 5.12	Tercera fase de aplicación del SLC-EModel	213
Figura 5.13	Cadena de Valor de la Evaluación de Madurez	214

ANEXOS

Anexo 1.1	Métodos de Investigación Seleccionados - SLC-EModel
Anexo 1.1A	Entrevista exploratoria
Anexo 1.1B	Marco Conceptual de la Investigación en Gestión de Construcción
Anexo 4.1	Formulario de Entrevista a Expertos
Anexo 4.2	Formulario de Encuesta Madurez LC en la GPC
Anexo 4.3	Respuestas de Encuestas Etapa II - MAYO 29 2018 - 111 Atributos
Anexo 4.4	Selección de Atributos de Madurez - Validez Racional
Anexo 4.5	Validez de la información para los FM
Anexo 4.6	Ajuste del Modelo SEM
Anexo 4.7	LISREL - Portland State University - LISREL Matrix Notation
Anexo 4.8	Cuadros de Efectos Todas las Rutas del SEM
Anexo 4.9	Efectos indirectos en el SEM e Intervalos de Confianza
Anexo 4.10	Relaciones Directas e Indirectas y Tamaños de los Efectos entre FM
Anexo 4.11	Calculo de Relaciones Indirectas entre Factores de Madurez
Anexo 5.1	Modelo Estadístico
Anexo 5.2	Aplicación SLC-EModel

RESUMEN

Contexto: Lean Construction (LC) se propone como un sistema de gestión de producción de proyectos de construcción que propende a la mejora de la eficiencia de sus proyectos. La utilización de LC propicia la reducción de desperdicios de materiales, tiempo y esfuerzo en todas las fases del proyecto para cumplir eficazmente con la oferta de valor. La integración de LC en la Gestión de Producción de Proyectos de Construcción (GPC) es un proceso sistemático, susceptible de ser evaluado con el uso de herramientas que permitan conocer la capacidad del sistema para el cumplimiento de la oferta de valor. En este sentido, en el ámbito investigativo se evidencia el desarrollo y la adaptación de algunas herramientas para evaluar el nivel de avance de la madurez de LC en organizaciones de construcción. Sin embargo, la mayoría de ellas se enfocan en la etapa de construcción, pocas en las otras fases del proyecto y más escasas aun, en todo su ciclo de vida. Asimismo, no se evidencia la existencia de herramientas que apoyen la evolución hacia niveles superiores de madurez.

El Modelo de Evolución de Lean Construction en la Gestión de Producción de Proyectos de Construcción (SLC-EModel) es un método de evaluación organizacional enfocado en la gestión de producción del proyecto de construcción. Este método responde a la necesidad del corporativo de conocer el nivel de alcance de la madurez de LC en la GPC, y establecer acciones precisas de mejoramiento que conduzcan al alcance progresivo de dicha madurez. Un modelo de este tipo es considerado un artefacto útil, que responde a la necesidad de resolver un problema de la vida real, en el campo específico de la producción de proyectos de construcción que hacen uso de LC para su gestión de producción.

Propósito: Entregar a la industria de la construcción una herramienta que evalúe el nivel de madurez de LC en la GPC y oriente con precisión las acciones necesarias para alcanzar un mayor nivel de madurez. Esta evolución implica la intervención en el Sistema de Producción de Proyectos de Construcción (SPPC) en la búsqueda de la mejora de su eficiencia y el cumplimiento de la oferta de valor de manera continua. El valor de esta investigación está en la identificación de los elementos clave involucrados en la madurez de LC en la GPC y las relaciones entre estos conformados como un sistema.

Objetivo: Diseñar un modelo de evolución de Lean Construction en la gestión de proyectos de construcción. Para el cumplimiento de este objetivo se precisan las características de la madurez de LC en la GPC de acuerdo con el enfoque de producción Lean, se escogen los elementos involucrados en la madurez e identifican las relaciones entre ellos para estructurar el modelo de evolución de LC en la GPC, y se desarrolla una herramienta de evaluación de madurez de LC en la GPC que permita conocer el nivel actual de madurez para orientar su evolución hacia niveles superiores de madurez.

Metodología: La metodología utilizada en esta investigación es fundamentalmente constructivista y se aborda como una combinación de métodos y herramientas de la investigación cualitativa y cuantitativa. De esta manera se entiende con más precisión la problemática a estudiar y la complejidad del fenómeno de madurez para el desarrollo del modelo.

Resultados: Se desarrolló el Modelo de Evolución de LC en la GPC, el SLC-EModel con el cual se evalúa la madurez de los elementos responsables de ella. El SLC-EModel confirma la naturaleza sistémica de la implementación de Lean. La investigación ofrece una estrategia de evolución para llevar a la GPC hacia un mayor nivel de madurez al utilizar LC como Sistema de Gestión de la Producción. El aporte al conocimiento se materializa en disponer de una herramienta validada en forma de un modelo de aplicación de LC en la GPC. El modelo se compone de otras herramientas: (a) un Modelo de Evaluación de Madurez (SLC-MM), que cuenta con tres categorías, siete factores de madurez (FM) y 35 atributos de madurez; (b) un Modelo de Calificación (SLC-QM), el cual contiene la formulación para obtener siete índices locales de madurez (ILM), uno por cada FM, y un índice global de madurez (IGM), con el cual se califica la madurez de LC en la GPC; y (c) la Estrategia de Evolución (SLC-SM). Adicionalmente, se propone un grupo de definiciones como aporte al conocimiento. Los conceptos desarrollados en la investigación se basan en el conocimiento extraído de manera sistemática de los expertos involucrados en la investigación.

Conclusiones: Se precisan las características que se deberían apreciar en un proceso de madurez de LC en la GPC, con las cuales se obtiene el modelo de evolución validado. Este modelo contiene elementos identificados como responsables de la madurez. Estos elementos se agrupan en atributos, que a su vez se agrupan en factores de madurez y estos en categorías.

La investigación permitió identificar las relaciones entre los elementos responsables de la madurez. Con estos objetivos cumplidos, se desarrolla el SLC-EModel, el cual es validado con rigurosidad en cada paso de su construcción.

El modelo desarrollado tiene su origen en la necesidad de estudiar la madurez y proponer estrategias de evolución de LC en la GPC. Un aporte significativo de la investigación corresponde a que este modelo resulta ser genérico y puede ser adaptado y aplicado a otros sectores tanto de manufactura como de servicios. Los factores de madurez reconocen la configuración de un proceso de producción de manera genérica, un sistema de producción definido por tres categorías: (a) las Personas, (b) el Sistema de Producción, y (c) el Soporte que la organización ofrece a la producción.

Trabajos futuros: Entre los trabajos previstos a partir de la obtención del SLC-EModel está el desarrollo de la Herramienta de Evaluación de la Madurez (SLC-MAET). Esta es la herramienta con la cual se evalúa y califica la madurez de cada uno de los atributos para hacer uso del modelo de evolución. Otro de los trabajos futuros corresponde a desarrollar el software y la metodología de uso de este, de tal manera que soporte la implementación del modelo en organizaciones de construcción. De igual manera realizar la implementación del SLC-EModel para validar su desempeño con datos de campo.

Palabras clave

Cumplimiento de la oferta de valor, desempeño de LC, estrategia de evolución de madurez, evaluación de madurez, evaluación de LC, evolución de madurez, flujo de valor, gestión de producción de proyectos de construcción, implementación de LC, índice de madurez, Lean Construction, madurez, oferta de valor, pensamiento sistémico, producción de proyectos de construcción, modelo de madurez.

ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis se desarrolla en cinco capítulos. Otros elementos que la complementan se han integrado en los anexos de este documento. Por último, se presentan las conclusiones y recomendaciones, y se compilan las referencias utilizadas en la investigación. A continuación, se describen los temas que aborda cada capítulo:

Capítulo 1. Introducción al proceso de investigación

En este apartado se presentan la formulación de la investigación y la metodología utilizada para desarrollar las actividades que permitan el logro de los objetivos. Se precisan los aspectos que conducen la investigación, entre ellos la propuesta de investigación, en el marco de una metodología de investigación apropiada para la gestión de construcción.

Capítulo 2. Lean en el sector de la construcción

En este capítulo se presentan conceptos que integran aspectos de la Ingeniería Industrial, de Producción, Construcción y Lean Construction. Se desarrolla en dos secciones: Integración de Lean en la producción de proyectos de la construcción y la evaluación del desempeño de Lean Construction. La segunda sección extrae información del artículo publicado en la revista *Espacios* en 2017, cuya investigación buscó identificar herramientas de evaluación de la madurez de LC, con particular interés en la GPC.

Capítulo 3. La madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

En este capítulo se desarrolla el primer objetivo específico. El capítulo consta de tres secciones: (a) implementación de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción, (b) la madurez Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción, y (c) los modelos de madurez como herramientas de mejoramiento.

Capítulo 4. Identificación de la madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

En este capítulo se presenta el desarrollo del SLC-EModel desde la identificación de los elementos asociados con la madurez, la construcción del Modelo de Ecuaciones Estructurales (Structural Equation Modeling [SEM], por su siglas en inglés), que es la herramienta con la que se identifican las relaciones entre los elementos del sistema, la definición de los índices locales de madurez (ILM), el índice global de madurez (IGM) y los perfiles con los que se conduce la Estrategia de Evolución (SLC-ES). En este capítulo se desarrolla el objetivo específico.

Capítulo 5. Modelo de Evolución de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

Este capítulo despliega el desarrollo del Modelo de Evolución de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción, el cual se compone de un modelo de madurez y una estrategia para alcanzar el siguiente nivel de madurez. En este capítulo se desarrolla el tercer objetivo específico.

Conclusiones, recomendaciones y trabajos futuros

Se presentan las principales características de la investigación. De igual manera, se ofrece una serie de recomendaciones tanto para el uso del modelo en investigaciones futuras como para que profesionales con conocimiento y experiencia en Lean o LC puedan adaptar el modelo a la Gestión de producción de proyectos de construcción de la Organización.

FORMULACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Resumen

En este capítulo se presentan los aspectos que conducen la investigación, en el marco de una metodología de investigación apropiada para la gestión de producción de proyectos de construcción. En la formulación de la investigación se sustenta la problemática que la hace relevante para ser objeto de investigación, se formulan las preguntas de investigación que dan paso a los objetivos, se hace referencia a antecedentes relevantes y al estado del arte, en términos de investigaciones orientadas a este interés, y se presentan las actividades previstas para el cumplimiento de los objetivos. De otra parte, se describen los aportes de esta investigación y los aspectos que sustentan su originalidad.

Definiciones

Para un mejor entendimiento de los aspectos principales de esta investigación, se presentan a continuación dos definiciones propuestas en el desarrollo de la investigación, las cuales más adelante se retoman con el ánimo de explicar su formulación e importancia para la misma.

Definición de la madurez

Es aquel estado de máximo desarrollo, o estado de excelencia, que ofrece la capacidad de volver realidad el objetivo proyectado con el más eficiente uso de los recursos disponibles. Es un estado que se va alcanzado paulatinamente al transitar por diferentes niveles de madurez, que permiten escalar hacia un estándar máximo, un nivel de excelencia de referencia para el contexto, un “Gold Standard” (Cano y Rivera, 2015).

Definición para Lean Construction

Lean Construction es un Sistema de Gestión de la Producción de Proyectos de Construcción, cuyo objetivo es garantizar el cumplimiento de la oferta de valor por medio de (a) la aplicación de los principios de la producción Lean en la industria de la construcción, (b) el desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas, con enfoque en el cliente, y de autoevaluación permanente, y (c) la utilización e innovación de la tecnología para la gestión y mejoramiento continuo de la producción

1.1 Introducción

Las organizaciones de construcción desarrollan su actividad productiva a partir de proyectos, sin embargo, esta investigación no se centra en la organización de construcción, sino en el proceso de gestión de producción de proyectos de construcción (GPC) y la mejora de su desempeño con la implementación de Lean Construction (LC) por ser este el proceso con el cual se obtiene el producto. El sujeto de estudio es la GPC y la organización se integra al estudio como el facilitador de la producción con sus procesos de apoyo.

La GPC articula los elementos relacionados con la producción de proyectos de construcción en busca de los mejores resultados del negocio e integra LC con el propósito de hacer más eficiente el proceso, y que madure para que el negocio de construcción sea más rentable. Es por ello que esta investigación abarca desde identificar los elementos relacionados con la madurez de LC en la GPC hasta proponer una estrategia de evolución de dicha madurez. En este sentido, un mayor nivel de madurez supone mejoras en la eficiencia del sistema de producción. En la medida en que el proceso de GPC madura, se deberían evidenciar en el proyecto mejoras sistemáticas. La GPC debe permitir la integración de enfoques que lleven a mejoras globales a partir de la mejora de cada uno de los componentes del sistema. Es entonces que LC se presenta como uno de esos enfoques de mejora. El interés es identificar el nivel de madurez de LC en la GPC, y a partir del conocimiento de este nivel, proponer la manera de ir hacia uno superior.

La madurez de LC es un tema de interés académico muy reciente y la literatura aún es escasa. A partir del 2014, las empresas de construcción interesadas en LC disponen de un primer modelo de madurez, el Lean Construction Maturity Model (LCMM) desarrollado por Nesensohn (2014), presentado también en Nesensohn, Bryde, Ochieng y Fearon (2014). Este modelo se concentra en la organización de construcción e incluye al proyecto de construcción como uno de los factores de su modelo -Procesos y Sistemas- a diferencia del SLC-EModel que se enfoca en la GPC. Este modelo guarda importancia para esta investigación por la disponibilidad de la información recolectada que el autor ha dejado a disposición de otras investigaciones, la cual ha sido integrada a la presente como una de las fuentes bibliográficas principales.

1.2 Motivación

Contribuir al mejoramiento de la productividad del sector de la construcción, a partir de un mejor desempeño de los proyectos. Esta mejora de productividad se obtiene con ayuda de una herramienta que apoye el alcance de altos niveles de eficiencia del Sistema de Producción de Proyectos de Construcción (SPPC) mediante la evaluación de su estado actual de madurez. Estos altos niveles de eficiencia se logran en la medida que avanza hacia la madurez. El propósito es la búsqueda de la mejora progresiva del SPPC, haciendo uso de LC en la GPC, de manera que se garantice el cumplimiento de la oferta de valor con altos niveles de confianza.

1.3 El problema de investigación

El problema de investigación corresponde a ***la necesidad de disponer de una herramienta que permita conducir un proceso de evolución de la madurez de LC en la GPC hacia un estado superior de madurez.*** La madurez de LC es un tema de recientemente interés de organizaciones e investigadores. Ante esta necesidad, hay una escasa disponibilidad de herramientas para evaluar la madurez de LC. En la actualidad, se dispone de un modelo de madurez de LC con enfoque en la organización de construcción, y otras herramientas que evalúan el estado de la aplicación de prácticas en obra (Nesensohn, 2014), (Hofacker et al,

2008), (Vieira et al, 2012), (Valente et al, 2012), (Etges et al, 2012), (Tezel y Nielsen, 2013) y (Limón, 2015). En la revisión de la bibliografía correspondiente al alcance de esta investigación, no se identifican herramientas específicas que direccionen la manera de alcanzar el siguiente nivel de madurez de LC.

Hasta ahora, el interés de investigadores y académicos respecto a este tema se ha centrado en la consolidación de la definición de madurez de LC y en el desarrollo de herramientas que ayuden a medirla. En este sentido, se evidencia la escasa disponibilidad de artefactos o herramientas contextualizadas para evaluar el avance de la madurez de LC, así como de estrategias soportadas cuantitativamente, para avanzar hacia el máximo nivel de madurez. Asimismo, no se evidencian estudios enfocados en la madurez de LC en la GPC. (Cano et al, 2017)

LC fue propuesta en la industria de la construcción hace ya más de dos décadas por Koskela (1992). Este autor estudió el desarrollo de Lean en manufactura, lo que le permitió proponer su aplicación en construcción con una estrategia de mejoramiento de la productividad en este sector. Este mejoramiento debería ser evaluado de manera sistémica y así identificar efectivamente los puntos de intervención para el mejoramiento de la eficiencia del SPPC, lo que redundaría en un mejoramiento de la productividad. Como producto de esta investigación en el año 2017 fue publicado un artículo que realiza una revisión del estado del arte con la cual se identifican entre otros aspectos el aumento de las publicaciones y la diversidad de los temas relacionados con LC. (Cano et al, 2017)

Autores como Aziz y Hafez (2013) sustentan que los proyectos desarrollados con apoyo en LC son más fáciles de gestionar, permiten el planteamiento de objetivos claros y alcanzables según las expectativas del cliente, con mejor desempeño de la seguridad en la construcción, cuestan menos, aumentan la confiabilidad en los compromisos de entrega y se percibe una notable mejora en la calidad del producto final. Estas cualidades, entre otras, vienen posicionando a LC como una estrategia de gestión de rápido crecimiento en su uso, lo que se evidencia en la mejora de la productividad para el sector (Sage, Dainty y Brookes, 2012). Según estos autores, se parte de algunas consideraciones:

- La implementación de LC en la producción de proyectos de construcción mejora la eficiencia del proyecto.

- Un mayor nivel de madurez en LC contribuye a la mejora de la eficiencia del SPPC.
- La mejora de la eficiencia influye directamente en el mejoramiento de la producción y en el cumplimiento de la oferta de valor con altos estándares.
- La mejora de la producción influye directamente en el mejoramiento de la productividad de la organización.
- La mejora de la productividad de la organización contribuye al mejoramiento de la productividad del sector.

La implementación de LC es un proceso sistemático (Gao y Low, 2014) y requiere identificar las condiciones y las acciones adecuadas para obtener el mayor provecho de su utilización. Es conveniente conocer el nivel de impacto de dicha implementación en el SPPC y proponer acciones que promuevan un avance hacia un nivel superior. Esta investigación supone que *un mejor sistema de producción aumenta la confiabilidad en el cumplimiento de la oferta de valor*. Para esta investigación, la autora propone la siguiente definición del “cumplimiento de la oferta de valor”, como eje para el desarrollo de esta.

Definición del cumplimiento de la oferta de valor

Es la materialización de los requerimientos del cliente, al integrarlos al producto o servicio, en su fabricación o desarrollo, luego de ajustar el sistema de producción a una adecuada interpretación de las expectativas del cliente.

Para conocer el estado de LC en la GPC se requiere de un artefacto o herramienta de evaluación, como el Modelo de Madurez (MM), el cual permite identificar el alcance progresivo de la madurez de la GPC con respecto a un estándar. Una vez identificado el nivel de madurez, se establece la brecha entre el estado actual y el estándar, con la cual se proponen acciones para el avance hacia un mayor nivel de madurez.

En el ámbito académico están disponibles algunas iniciativas para evaluar la implementación de LC, como la de Hofacker *et al.* (2008) y la de Etges, Saurin y Bulhões

(2013), que han sido aplicadas a organizaciones de construcción en Brasil y Alemania; y el Modelo de Madurez con enfoque en las organizaciones de construcción de Nesensohn (2014; 2017). Pero no se identifican estrategias estandarizadas para alcanzar sistemáticamente el siguiente nivel de madurez. La acción más común es proponer planes de mejoramiento basados en la evaluación con el uso de estas iniciativas de evaluación (Cano, Botero y Rivera, 2017).

Diekmann, Krewedl, Balonick, Stewart y Won (2004) presentan recomendaciones y propuestas para realizar una exitosa implementación de LC en organizaciones de construcción. Se basan en la incorporación de estudios del movimiento de trabajadores, similar a los estudios realizados por ingenieros industriales y analistas de operaciones en manufactura, respaldando el hecho de que “la productividad en las operaciones de construcción puede mejorarse y que hay muchas herramientas, técnicas y métodos creativos que lo demuestran” (Salem y Zimmer, 2005, p. 53).

1.4 Exploración y definición del tema de investigación

El proyecto de construcción es un sistema de relaciones entre los elementos involucrados con la madurez, de esta manera, la evolución hacia mayores niveles de madurez debería implicar mayores niveles de eficiencia como una propiedad emergente del sistema. Con este supuesto, adquiere importancia disponer de una herramienta “apropiada” que evalúe la madurez y direcciona la forma de alcanzar niveles superiores de madurez de acuerdo con las relaciones identificadas entre los elementos del sistema. Entonces, sobre la eficacia de la implementación de LC como una estrategia para mejorar la eficiencia del sector de construcción, surgen diversos cuestionamientos, tales como:

- ¿Cómo pueden conocer las empresas de construcción que se está realizando una adecuada implementación de LC?
- ¿La implementación de LC que ellas realizan contribuye a mejorar la eficiencia del proyecto?
- ¿Cómo se logra mejorar la eficiencia del proyecto con la implementación de LC?

- ¿La implementación contribuye efectivamente a la mejora de la oferta de valor, y de qué manera?
- ¿La mejora en la oferta de valor es una consecuencia de la mejora del sistema de producción debido a la implementación de LC?

Para considerar estos cuestionamientos, luego de una investigación del estado del arte, se establece como tema de interés “la evolución de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción”. Este interés se enfoca en el diseño de un artefacto que ayude a direccionar la evolución de la madurez de LC en la GPC a partir de la evaluación de la madurez actual.

Ante el interés de obtener cada vez una mejor oferta de valor en la GPC, LC se propone como una estrategia de gestión apropiada para ser aplicada en el logro de este propósito, con enfoque en el cumplimiento de la oferta de valor. Al respecto, Koskela (2000) sostiene que “Para mejorar efectivamente la construcción mediante la aplicación de los nuevos conceptos, es necesario que las disciplinas de ingeniería y gestión de la construcción se reintegren con disciplinas genéricas centradas en operaciones, diseño, producción y proyectos” (p. 252); sin embargo, la implementación se enfrenta con múltiples retos, entre ellos: lograr el cambio de paradigma, vencer la resistencia al cambio, lograr el reconocimiento del concepto de madurez y entender los beneficios de contar con un proceso maduro.

En este mismo sentido, un nivel básico de madurez debería ser el vehículo para que una organización que se interese por una transformación LC, identifique la mejor forma de iniciar la implementación de LC. Para contar con un MM, se requiere identificar los elementos involucrados con la madurez y así revelar las relaciones entre ellos. Esta investigación parte de suponer que la madurez de LC en la GPC se obtiene de la madurez de los elementos involucrados en el mejoramiento del SPPC y la producción misma.

1.5 Preguntas de investigación

Luego de identificar el problema de investigación y de estudiar trabajos realizados con la orientación hacia la evaluación de madurez de LC (Capítulo 2), se plantean las preguntas de investigación que orientan la definición de sus objetivos (tabla 1.1).

Tabla 1.1. Preguntas que conducen la investigación

Pregunta principal	Preguntas complementarias
¿Cómo se pueden establecer estrategias de evolución de LC en la GPC, para alcanzar un mayor nivel de madurez en LC?	¿Qué caracteriza la madurez de LC en la GPC?
	¿Qué elementos, que ya son conocidos, deben ser considerados para la construcción de un modelo de evolución de LC en la GPC?
	¿Cómo es la adaptación de un sistema o herramienta de evaluación de la madurez de LC en la GPC?
	¿Qué características tienen los perfiles asociados a los niveles de madurez de LC en la GPC?
	¿Cuáles deben ser las acciones que conduzcan a mejorar continuamente la madurez de LC en la GPC?

1.6 Propósito de la investigación

Diseñar un modelo que dirija las acciones de evolución de LC en la GPC. Acciones que contribuyan a alcanzar sistemáticamente un mayor nivel de madurez, después de evaluar el nivel actual. Esta evolución implica la intervención al SPPC, con el fin de mejorar su eficiencia y el cumplimiento de la oferta de valor de manera continua.

1.7 Objetivos de investigación

1.7.1 Objetivo general

Diseñar un Modelo de Evolución de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción.

1.7.2 Objetivos específicos

- Precisar las características de la madurez de LC en la GPC de acuerdo con el enfoque de producción Lean.
- Escoger los elementos involucrados en la madurez e identificar las relaciones entre ellos, que conduzcan a estructurar el modelo de evolución de LC en la GPC.
- Desarrollar una herramienta de evaluación de madurez de LC en la GPC, que permita conocer el nivel actual para orientar su evolución hacia niveles superiores de madurez.

1.8 Contribución al conocimiento

Los resultados de esta investigación se consolidan en una contribución teórica, una práctica y una metodológica.

1.8.1 Contribución teórica

En esta investigación construye un símil entre los entornos de producción de proyectos de construcción y la producción en manufactura. Presenta el sistema de producción del proyecto de construcción como un *flujo secuencial de actividades acompasado por la unidad de producción*. De igual manera, presenta las diferencias entre la implementación de Lean en una empresa de construcción y una organización de manufactura o servicios que no sea de construcción.

A lo largo de la tesis se proponen definiciones de acuerdo con las temáticas abordadas. Estas definiciones pretenden contribuir a llenar un vacío en la literatura y soportar el desarrollo de la investigación, estas son: cumplimiento de la oferta de valor, Lean Construction como un Sistema de Producción y Modelo de Madurez de LC en la GPC.

El uso del modelo prevé una mejor comprensión de la manera como realizar una implementación precisa de LC en la GPC a partir del entendimiento de las condiciones iniciales de una organización que empieza su camino LC. Así, se consigue una mejor comprensión de la forma de identificar la madurez de LC en la GPC.

Esta investigación también provee del entendimiento que el proceso de producción de proyectos de construcción, así como otras actividades productivas, pueden ser desarrollados a partir de tres categorías: Personas, Sistema de Producción y Soporte de la Organización al Proceso de Producción. De esta manera se identifican con mayor precisión los elementos asociados con la madurez de cada una de estas categorías, como son los factores de madurez y los atributos de madurez.

La obtención de un modelo genérico, que puede ser adaptado y utilizado en otros sectores a partir de un modelo desarrollado con un interés específico, tiene un contenido teórico importante que lo hace versátil para su uso en diferentes contextos de producción. Esto se basa en la validez de las relaciones identificadas entre los elementos de madurez que

componen el modelo, la fuerza de dicha relación expresada por la influencia de un elemento en otro y los efectos que esta relación produce.

De otra parte, la conformación de los factores de madurez a partir de la agrupación de los atributos correlacionados representa con precisión conceptos reconocidos por el cuerpo académico y practicante de LC. Esta conformación surge de las correlaciones entre los atributos, las cuales se presentan a partir del conocimiento de los expertos consultados.

1.8.2 Contribución práctica

El principal resultado de la investigación es el modelo de evolución compuesto por un modelo de madurez y una estrategia de evolución, lo que desde el punto de vista práctico ofrece a las organizaciones de construcción una herramienta para el mejoramiento continuo de LC en la GPC, la cual también puede ser utilizada para identificar las necesidades de la organización interesada en iniciar su camino LC a partir de la evaluación de su estado inicial.

La obtención de los índices de madurez, los índices locales y el índice global de madurez, a partir de los resultados del Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM, por sus siglas en inglés) muestran, de manera práctica, cómo hacer uso del potencial de los resultados del SEM para futuras aplicaciones en este u otros intereses de investigación.

La utilización de los índices de madurez es una contribución práctica para calificar los elementos responsables de la madurez de LC en la GPC: atributos, factores y madurez general. Esta utilización constante y continua ofrece a la comunidad profesional y académica una forma de identificar esta madurez, lo que permite desarrollar un lenguaje común a la vez que se construye una cultura de autoevaluación permanente.

Una vez obtenido el SLC-EModel, se confirma que contiene otros submodelos que subyacen en él, lo cual sugiere un potencial adicional de uso para que con la misma evaluación de madurez se obtengan no solo los índices mencionados anteriormente, sino también índices equivalentes de madurez para estos submodelos. Se pueden identificar preliminarmente submodelos como calidad, seguridad en el proyecto, desarrollo de la cultura Lean, entre otros.

El direccionamiento para la evolución que ofrece el SLC-EModel reconoce diversas posibilidades para alcanzar el siguiente nivel de madurez definido por la Alta Dirección; sin

embargo, el reconocimiento de las condiciones y posibilidades reales de evolución permite acercarse al nivel de madurez objetivo.

Es un aporte práctico el contar con un modelo que incorpora las características propias e intrínsecas de la construcción, y LC en una estrategia de mejoramiento de la eficiencia de los proyectos de construcción.

Esta investigación y el SLC-EModel contribuyen a desarrollar capacidad organizacional de autoevaluación y autogestión en todos los niveles de la organización, lo cual aporta a la evolución del proceso de GPC.

De manera práctica, es una simulación de la calificación de la madurez que permite obtener los perfiles de los estados de todos los elementos del modelo. Esto hace posible identificar las fortalezas y las debilidades en la implementación de LC en la GPC, al calificar el estado actual de madurez, y a partir de este proponer las acciones de mejora para escalar al siguiente nivel.

1.8.3 Contribución metodológica

Este proceso de investigación utiliza métodos cualitativos y cuantitativos, con los cuales se obtiene la información. Asimismo, se desarrolla de manera sistemática, dando lugar a un protocolo con el cual la investigación puede ser reproducida en diferentes contextos y entornos de producción.

Una contribución valiosa de la investigación es la obtención de información de expertos LC, la cual, luego de ser integrada al estudio, ofrece resultados que se revierten en beneficio de la evolución de LC en la GPC.

Esta investigación adapta una metodología para el mapeo de referencias bibliográficas, tomando como base elementos conceptuales y metodológicos de dos metodologías de mapeo sistemático de referencias bibliográficas en temas de gestión de la construcción.

De igual manera, es una contribución el desarrollo de la metodología para construir el SEM aplicado a LC en la GPC, que puede ser reproducida para otros intereses similares de investigación en temáticas relacionadas con la gestión de construcción. Este proceso conduce

a reconocer las relaciones entre los elementos y realizar el análisis de su impacto para el problema en cuestión.

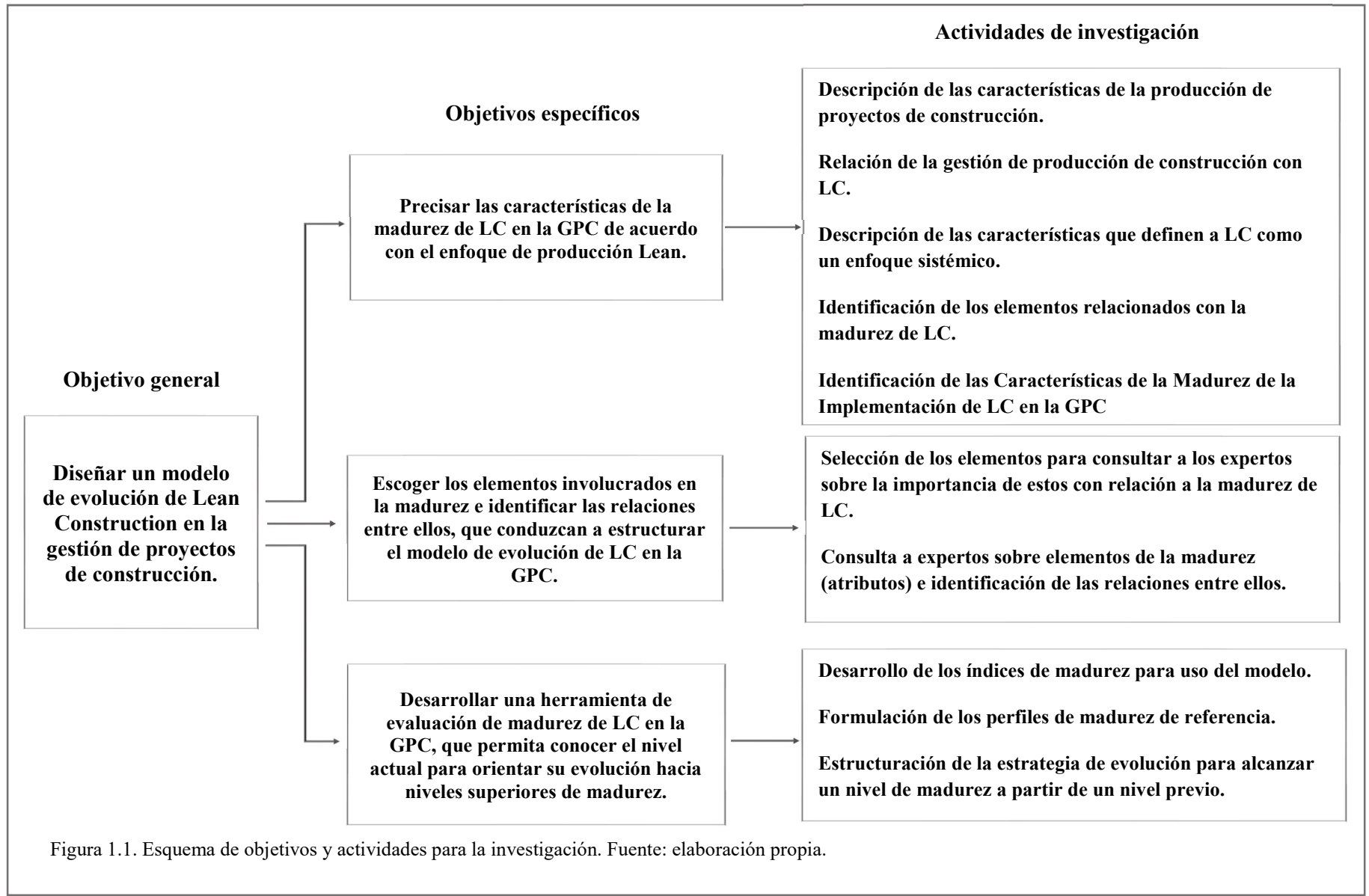
1.9 Originalidad de la investigación

La originalidad de esta investigación radica en la identificación de los elementos en los cuales se aprecia la madurez y las relaciones entre ellos. Además, en la forma en que estos elementos se agrupan y en la cuantificación de las relaciones y sus efectos para identificar la madurez de LC en la Gestión de producción de proyectos de construcción por medio de la estimación de índices de madurez. Se logra dar un paso adelante en la manera de establecer las estrategias para llegar a niveles superiores de madurez.

1.10 Metodología del estudio

La investigación se adelanta siguiendo una serie de etapas secuenciales, las cuales inician con la propuesta de investigación que agrupa los objetivos de investigación y, alrededor de ellos, las actividades que se desarrollan para obtener el SLC-EModel. Para esta metodología se han seleccionado estrategias de recolección y análisis de la información que permiten la interacción con los expertos académicos y practicantes LC en diversas partes del mundo (Anexo 1.1).

En la figura 1.1 se relacionan los objetivos específicos que se despliegan del objetivo principal de esta investigación. A su vez cada objetivo principal se desarrolla a través de actividades con sus entregables, por medio de los cuales se verifica el cumplimiento de los objetivos específicos y, con el cumplimiento de estos, del objetivo general.



1.10.1 Actividades metodológicas del primer objetivo específico

El primer objetivo específico contribuye a entender las características de la madurez de LC en la GPC, basadas en el conocimiento de expertos y enmarcadas en el desarrollo de la construcción como un proceso de producción con características equivalentes a manufactura. Estas características acercan a los interesados a un mejor entendimiento de la actividad edificadora como una actividad de producción que puede ser continuamente mejorada. El entendimiento de la madurez contribuye a identificar los elementos responsables de esta, los cuales se agrupan más adelante en categorías, factores de madurez (FM) y atributos para constituir el SLC-EModel. Las actividades metodológicas consisten en:

- **Descripción de las características de la producción de proyectos de construcción**

A partir de las características de la producción en manufactura, se busca describir el proceso de producción de proyectos de construcción en términos del entorno de producción y del sistema de producción en el que se desarrolla este tipo de proyectos. Se hace uso del contexto teórico relacionado, revisión de las referencias bibliográficas, entrevistas a personas claves y se consolidan los elementos teóricos para describir estas características para los proyectos de construcción.

Esta descripción conecta elementos de la producción industrial, con la producción en construcción, que contribuyan a avanzar hacia procesos cada vez más tecnificados en su ejecución y así proveer las condiciones para el entendimiento del enfoque de producción LC. Esta descripción se presenta en el Capítulo 2.

- **Relación de la Gestión de Producción de Construcción con Lean Construction**

La gestión tradicional de proyectos de construcción se realiza por medio de procesos desarrollados de manera *ad hoc*, reproduciendo continuamente las mismas prácticas. Esta actividad de investigación pretende entender la relación de LC en la GPC con la cual conducir la búsqueda de las categorías para el modelo. El resultado de esta actividad se presenta en el Capítulo 2.

- **Descripción de las características que definen a LC como un enfoque sistémico**

En algunas referencias académicas se resalta el enfoque sistémico de Lean. Este concepto se ha llevado a LC de la misma manera en que se concibe en manufactura, sin embargo, guarda relevancia entender dicho enfoque en la utilización de LC en la GPC, ya que esta es una condición importante para la configuración del modelo y la búsqueda de las relaciones entre los elementos responsables de la madurez. El resultado de esta actividad se presenta en el Capítulo 2.

- **Identificación de los elementos relacionados con la madurez de LC**

De acuerdo con un estudio sistemático de referencias bibliográficas, se identifica una diversidad de elementos que han sido utilizados en el desarrollo de diversas iniciativas de evaluación del desempeño de LC y en la construcción de un modelo de madurez. Además, se hace uso de consulta a expertos por medio de entrevistas, con las cuales se identifican también estos elementos. El resultado de esta actividad se presenta en el Capítulo 3.

- **Identificación de las características de la madurez de la implementación de LC en la GPC**

Esta actividad consiste en extraer del conocimiento y experiencia de los practicantes, consultores, académicos e investigadores respecto de las características que tendría un proceso maduro de la implementación de LC en la GPC. Estas características revisten de importancia para la investigación debido a que con ellas se construye un cuerpo de conocimiento para entender cómo conducir el proceso de madurez de cara a alcanzar el mayor nivel de madurez. El resultado de esta actividad se presenta en el Capítulo 3.

1.10.2 Actividades metodológicas del segundo objetivo específico

Para el segundo objetivo se hace uso de entrevistas a los expertos en diferentes momentos de la investigación. Cada entrevista lleva sistemáticamente a la identificación de los elementos de interés en la investigación y orientan el estudio de las referencias bibliográficas. Estas actividades conducen a identificar elementos relacionados con la

madurez de LC en la GPC, los cuales se agrupan en los atributos de madurez y son objeto de validación racional con lo cual se confirman los que deben ser incluidos en el estudio. Más adelante, con esta información y el uso de SEM, se identifican las relaciones entre todos los elementos de madurez involucrados en el modelo y así desarrollar el SLC-EModel. Todas las actividades para este objetivo se reportan en el Capítulo 3.

- **Seleccionar los elementos para consultar a los expertos sobre la importancia de estos con relación a la madurez de LC**

Una vez se cuenta con los elementos relacionados con la madurez que se obtienen de la consulta bibliográfica y a expertos, se hace necesario agruparlos según la definición de criterios para este fin. Con esto se obtienen otros elementos de un nivel superior compuesto por los elementos iniciales agrupados, los cuales se denominan atributos. Con estos atributos se consulta a expertos en el marco del desarrollo de una validación racional para seleccionar los atributos que serán objeto, más adelante, de la consulta principal a expertos por medio de una encuesta con la cual se fundamenta el análisis de la información con el uso de SEM.

- **Consulta a expertos sobre elementos de la madurez (atributos) e identificación de las relaciones entre los elementos**

Aplicación de la encuesta a expertos en el uso de LC en otros países. Se selecciona un amplio grupo de expertos en diferentes ubicaciones en el mundo –practicantes, consultores, investigadores y académicos– consultados previamente en la investigación de referencias bibliográficas y en las entrevistas realizadas previamente.

Con los resultados de la encuesta, se hace uso del SEM desplegando completamente la aplicación del método para la identificación de las relaciones entre los nuevos elementos de madurez que se configuran con él. Así, se obtienen los factores de madurez (FM), los cuales están compuestos por los atributos más correlacionados. En el desarrollo del SEM se va realizando la validación de la información y del modelo mismo, con lo cual se asegura la validez de la información obtenida del SEM.

1.10.3 Actividades metodológicas del tercer objetivo específico

El tercer objetivo se centra en el desarrollo del modelo, el cual se compone de un Modelo de Madurez (MM) y de la Estrategia de Evolución. Para el MM se desarrollan dos herramientas: una para captar la evaluación de madurez de cada atributo y otra para calificar la madurez de los elementos según la formulación obtenida con las relaciones del SEM. La madurez se presenta a través de los perfiles de madurez, con los perfiles y la madurez objetivo se consolida la estrategia de evolución. La validación del modelo se lleva a cabo en cada uno de los pasos de elaboración y análisis del modelo.

- **Desarrollo de los índices de madurez para uso del modelo**

Los resultados del SEM se utilizan para la construcción de los índices de madurez. Estos índices corresponden a la calificación de la madurez para los factores de madurez (FM) y para la madurez global del modelo. Ambos permiten conocer el nivel de madurez de la LC en la GPC y son la referencia para la toma de decisiones respecto de la estrategia de evolución.

- **Formulación de los perfiles de madurez de referencia**

Una vez establecida la formulación para la obtención de los índices de madurez, se construyen los índices de referencia, es decir, aquellos que corresponden con niveles normalizados. Estos niveles serán la referencia para comparar los resultados de madurez obtenidos en cada evaluación de madurez en la GPC. Estos perfiles se constituyen en insumos para tomar decisiones respecto de la estrategia de evolución.

- **Estructuración de la estrategia de evolución para alcanzar un nivel de madurez a partir de un nivel previo**

La evaluación de la madurez es una actividad que debe ser llevada a cabo en campo con el uso de una herramienta para recolectar la información. Esta evaluación se enfoca en identificar el alcance de la madurez de cada atributo, y se traslada a la formulación con la cual se obtienen los índices de madurez para conocer el nivel de madurez alcanzado en cada uno de los atributos, los factores de madurez y la madurez global.

El usuario del modelo define el nivel de madurez objetivo, con el cual se hace uso de

la formulación para buscar diferentes combinaciones de madurez de atributos, y así alcanzar dicha madurez objetivo, lo que es la base junto con el conocimiento de la realidad de la organización para definir las acciones de avance de madurez respecto de cada atributo. Para este fin se desarrolla un aplicativo con una herramienta de fácil entendimiento y utilización.

1.11 El Modelo de Evolución de la Madurez como un artefacto según el Design Science Research (DSR)

El SLC-EModel es un artefacto, por lo que la aplicabilidad del paradigma del DSR es pertinente. Esta investigación tiene que ver con gestión y con personas, lo que la acerca a una investigación cualitativa similar a la utilizada en temas propios de gestión y humanidades. Este enfoque es requerido para desarrollar la investigación cualitativa cuyo tema se enmarca en la gestión de la construcción con una directa relación con personas.

Para el desarrollo de nuevos modelos de madurez se resalta un modelo de proceso presentado por Becker, Knackstedt y Pöppelbuß (2009), el cual contiene ocho fases que siguen las directrices de Hevner, Marcet, Park y Ram (2004), y recomienda que el modelo sea evaluado para demostrar su idoneidad por medio de métodos que expongan la rigurosidad de la investigación. Este es el punto diferenciador entre artefactos diseñados con el propósito de contribuir a resolver la cuestión y aquellos orientados al desarrollo de modelos conceptuales. En el Anexo 1.1B se explican en detalle los conceptos del DSR.

March y Smith (1995) afirman que el proceso de investigación se basa en la creación de “cosas” que sirven a los propósitos humanos y la evaluación de su desempeño en uso. La investigación en DSR implica desarrollar tres ciclos: relevancia, diseño y rigor.

- **El ciclo de relevancia:** Se proporcionan tanto los insumos de la investigación a manera de requisitos como las restricciones para su diseño, y se definen los criterios de aceptación de la evaluación de los resultados de la investigación.
- **El ciclo de diseño:** Actividades y procesos centrales de la investigación. Se desarrollan la construcción y la evaluación de los artefactos de diseño (Hevner, 2007). Se propone la hipótesis del comportamiento esperado con la cual se cuestiona, se buscan

explicaciones, y, si es necesario, se lleva a cabo una modificación a la solución propuesta (Manson, 2006).

- **El ciclo de rigor:** Se proporciona el conocimiento con el cual se aseguran soluciones factibles accediendo a las teorías que sustentan el conocimiento (Gregor y Jones, 2007). Aquí los investigadores se obligan a hacer referencia a la base del conocimiento para garantizar que los artefactos producidos son contribuciones, no rutinarias, fundamentadas en la aplicación de procedimientos de investigación reconocidos.

La creación de conocimiento da lugar a la revisión detallada del problema, la cual conduce a un nuevo ciclo de diseño (Vaishnavi y Kuechler, 2007). En la fase de conclusión, al entender el impacto del problema, surge un nuevo ciclo de investigación dependiendo del alcance de este impacto. La etapa de construcción sin duda es la que implica la mayor cantidad de bucles, es un proceso iterativo e incremental (Hevner *et al.*, 2004). La aplicación y el ensayo de una solución preceden a su completo desarrollo, y solo a través de su estudio y utilización es posible formalizar los artefactos desarrollados (March y Smith, 1995).

1.12 La construcción de artefactos

Los artefactos obtenidos en DSR se perciben a partir del conocimiento que contienen, y deben ser útiles para abordar la solución a problemas relevantes para la organización (Gill y Hevner, 2013; March y Storey, 2008). Para orientar la investigación en DSR, Hevner *et al.* (2004) recomiendan:

- Diseñar un artefacto.
- Demostrar la relevancia del problema.
- Evaluar el diseño, demostrar la utilidad, la calidad y la eficacia del diseño rigurosamente.
- Proporcionar contribuciones de investigación.
- Garantizar el rigor de la investigación.
- Desarrollar el diseño como un proceso de búsqueda.

- Comunicar los resultados de la investigación.

La utilidad del artefacto, demostrada a partir de la evaluación, debe garantizar su sostenibilidad en el tiempo (Gill y Hevner, 2013), para lo cual se dispone de observación, análisis, experimentación, prueba y descripción (Hevner *et al.*, 2004). Por su parte, Vaishnavi y Kuechler (2007) y Peffers, Tuunanen, Rothenberger y Chatterjee (2008) sostienen que el diseño y la evaluación pueden llegar a revelar un problema totalmente diferente que hay que resolver. En ambos casos, estos conocimientos se integran a un nuevo ciclo de diseño dando lugar a cambios que a su vez requieren nuevas evaluaciones. Una solución es completa y eficaz cuando satisface los requisitos y restricciones del problema que estaba destinado a resolver. Por medio del DSR se desarrollan e implementan soluciones innovadoras para abordar problemáticas de gestión en la construcción (AlSehaimi, Koskela, & Tzortzopoulos, 2013).

1.13 Puntos clave de la sección

Con esta investigación se busca dotar a la comunidad de practicantes, académicos e investigadores de LC, de una herramienta práctica que proponga acciones de evolución de LC en la GPC a partir de la identificación del estado actual de madurez de LC en la GPC.

De acuerdo con Wendler (2012), para el desarrollo del Modelo de Evolución no es suficiente su existencia en términos de contenido y estructura, se requiere probar su utilidad para ser aplicados y conocer sus beneficios en el contexto para el cual se diseña. La necesidad de cumplir esta condición conlleva, para esta investigación, proponer una manera de aplicar el modelo considerando la participación de las personas en cada uno de los niveles jerárquicos de la organización, con el fin de construir la mejora de manera colaborativa.

Capítulo 2

LEAN EN EL SECTOR DE LA CONSTRUCCIÓN

Resumen

En el capítulo anterior se presentó el interés de investigación donde se establecen los objetivos y la metodología que se siguen para su desarrollo. En la primera sección de este capítulo se explora acerca de la integración de Lean en la Gestión de producción de proyectos de construcción (GPC) para fundamentar algunos de los elementos conceptuales que se utilizan para la construcción del modelo. Parte de esta fundamentación corresponde con el estudio de los principios de la producción Lean y Lean Construction (LC) para sustentar el Sistema de Gestión de la Producción Lean Construction.

En general, Lean busca que las personas en el sistema de producción participen en la construcción de una cultura de mejoramiento continuo, con el fin de eliminar los desperdicios y desarrollar su actividad con enfoque en el cliente. De igual manera, propicia el desarrollo de una organización que cuida de las personas que la conforman. Asimismo, se sugiere la inclusión de cuatro principios identificados para LC y se presenta una definición para LC a partir de la necesidad de contar con ella para la investigación en la evolución de LC en la GPC.

Adicionalmente, se describen los aspectos relacionados con la producción en construcción, la cual debe ser vista como un proceso sistémico de producción que, a diferencia de la manera tradicional en que esta se lleva a cabo en cualquier contexto, permita incrementar la productividad para mejorar los resultados del negocio por medio del cumplimiento de la oferta de valor.

En la segunda sección se presentan las iniciativas de evaluación de Lean Construction, como resultado de un riguroso estudio de referencias bibliográficas, las cuales demuestran el estado del arte en la temática de interés.

2.1 Integración de Lean en la producción de proyectos de construcción

La industria de la construcción aporta de manera significativa al desarrollo económico de un país (Ive y Gruneberg, 2000; Rangelova, 2015), y sus productos proveen de infraestructura pública y privada a las actividades productivas, lo que sustenta su desarrollo económico integrando diferentes empresas relacionadas (Stasiak-Betlejewska y Potkány, 2015; Wibowo, 2009). Este sector consume un alto porcentaje de materiales locales y propicia el incremento del empleo, lo que lo hace muy influyente en la mejora de la eficiencia económica; sin embargo, es un sector con un bajo nivel de desarrollo y alta ineficiencia (Anaman y Osei-Amponsah, 2007).

Los productos de construcción se llevan a cabo en fases secuenciales que requieren de un largo periodo de elaboración para disponer de ellos, haciendo un uso intensivo de mano de obra con bajo nivel de calificación, razón por la cual influye directamente sobre la economía del país. El producto de construcción requiere de una organización temporal para suplir todos los requerimientos para su elaboración (Koskela, 1992; Warszawski, 2005) y demanda la producción de bienes y servicios de otras industrias relacionadas (Stasiak-Betlejewska y Potkány, 2015), haciendo de este, un sector complejo con muchos sectores interrelacionados, tales como manufactura, energía y finanzas, entre otras (Bon, 1992).

En términos del desarrollo de un país, para poner en marcha cualquier proyecto de expansión de la economía se requiere inversión en infraestructura como condición previa para el crecimiento económico potencial (Hillebrandt, 2000; Ive y Gruneberg, 2000). En general, se aumenta el gasto público para proveer empleo, lo que tiene efecto en la empleabilidad de mano de obra no calificada (Ball y Wood, 1995). Se entiende entonces que cualquier cambio en esta industria produce un alto impacto en la producción económica del país, pues es una parte importante e integral de la producción nacional, lo que representa una proporción considerable en el producto interno bruto (PIB) de los países (Crosthwaite, 2000; Ganesan, 2000; Šatanová y Krajčírová, 2012), con una participación del 7 % al 10 % del PIB en países desarrollados, y entre el 3 % y el 6 % del PIB en países en desarrollo (Lowe, 2003).

En razón al alto impacto de la construcción en la economía de un país, los cambios que se implementen en esta industria tienen un efecto directo en su producción nacional, debido a que al aumentar la productividad laboral se impacta directamente la capacidad

competitiva de una economía, se reducen los costos de producción y se realiza una mejor oferta de precios (Coremberg, 2013; Crosthwaite, 2000; Ganesan, 2000; Myskova, 2009; Šatanová y Krajčirová, 2012). De esta manera, una mejoría en el sector de la construcción implica un aumento de su aporte al PIB, lo que genera un efecto multiplicador en la actividad económica, principalmente sobre la generación de empleo.

De otra parte, la ineficiencia del sector se asocia a la manera como las empresas de construcción han venido reproduciendo sistemáticamente la forma en que gestionan y llevan a cabo la producción de sus proyectos, por lo general, procesos desarrollados *ad hoc* (Teicholz, 2014). Como resultado, se obtienen proyectos ineficientes a pesar del uso de nuevas tecnologías (Aziz y Hafez, 2013; Fearne y Fowler, 2006; Guo, 2008; Koushki, Al-Rashid y Kartam, 2005; Teicholz, 2014). En el entorno internacional, según el estudio de Teicholz (2014) realizado en seis países de Europa y en Estados Unidos, la mejora de la productividad laboral en industria manufacturera es del orden de 1,7 veces mayor que en la construcción, con un crecimiento en las dos últimas décadas por encima del 3 % anual, mientras que, en ese mismo periodo, el de la construcción ha sido del -0,32 % anual. Según el autor, en tanto la industria de la construcción no realice cambios significativos en sus actuales prácticas de gestión y producción, habrá poca oportunidad de alcanzar un mayor nivel de eficiencia y será mucho más difícil alcanzar y sostener un nivel de eficiencia comparable con manufactura. Asimismo, sugiere que las causas de este comportamiento están asociadas con una inadecuada formación para el trabajo del personal de obra, precarios procesos de seguridad en construcción, una mayor complejidad de los proyectos y exigencia en el cumplimiento de plazos de construcción cada vez más cortos.

De acuerdo con Changali, Mohammad y Nieuwland (2015), una mejor gestión de proyectos y la innovación tecnológica pueden mejorar las posibilidades de éxito del proyecto de construcción. Algunos de los factores responsables de la baja productividad son la pobre organización, comunicación inadecuada, pobre gestión del proyecto, desacuerdos contractuales, inadecuada conexión entre los diferentes niveles de planificación, pobre planificación a corto plazo, insuficiente gestión de riesgos y limitada gestión del talento humano. De otra parte, Yi y Chan (2014), en su investigación sobre la productividad laboral en construcción, relacionan algunos factores, al nivel del proyecto,

que la impactan positiva y negativamente. Estos factores se agrupan en cinco componentes:

- **Gestión:** planificación, coordinación y control adecuados, programación realista.
- **Aspectos laborales:** convenios colectivos, prácticas de trabajo restrictivas, ausentismo, alta rotación del personal, retrasos, disponibilidad, nivel de experticia y uso de equipos.
- **Gubernamentales:** entorno político, reglamentos, normas sociales y ambientales.
- **Tipos de contratos:** aspectos asociados a la relación con el contratante.
- **Financiación:** estrategias adecuadas según el tipo de proyecto (Koehn y Brown, 1986).

2.1.1 Mejoramiento de la productividad del proyecto de construcción a partir del mejoramiento de la gestión de la producción

La entrega de un proyecto a tiempo, con la calidad y el costo previstos, el cumplimiento de especificaciones y el alcance prometido, tradicionalmente han sido los indicadores de éxito del proyecto. Sin embargo, en el proceso de producción del proyecto de construcción no es fácil identificar qué cosas pudieron realizarse con menos recursos, en menos tiempo, con mayor calidad y cuál fue realmente el valor agregado al cliente. Rubiano y Cano (2013) relacionan diversas situaciones en el desarrollo del proyecto que impactan negativamente su eficiencia, entre estas se tienen los bajos niveles de constructabilidad, el flujo intermitente de recursos financieros, el exceso de burocracia, de controles, revisiones y autorizaciones, los reprocesos de diseños y trabajos en obra, la pobre cualificación de contratistas y consultores, los ineficientes procesos de gestión contractual, entre otros. De acuerdo con Changali, Mohammad y Nieuwland (2015), esto refuerza el hecho de que la gestión del proyecto requiere de un cambio urgente.

El interés generalizado de mejorar la eficiencia del sector y aumentar la productividad, es una decidida intención por la cual el sector de la construcción a nivel mundial ha mostrado un interés creciente en implementar estrategias de mejoramiento que contribuyan con este propósito. Un ejemplo de ello es la estrategia del Reino Unido denominada “Construcción

2025”, que ha establecido un plan ambicioso de mejora que incluye, entre otros, los siguientes aspectos: reducir el tiempo de desarrollo del proyecto de construcción, desde su concepción hasta su entrega para operación, en 50 % tanto para construcción nueva como para remodelaciones; y reducir en 33 % el costo de construcción y el costo de mantenimiento. Para el cumplimiento de estos objetivos, tanto el Building Information Modeling (BIM) como Lean Construction son enfoques actuales en la construcción (Aziz y Hafez, 2013).

De acuerdo con Sacks et al (2010) BIM y LC siendo enfoques independientes desarrollan una importante sinergia para su utilización en la industria de la construcción. Esto se logra a partir de las relaciones que pueden ser establecidas entre ellos en el desarrollo del proyecto. Las prácticas BIM pueden ser adoptadas de manera independiente de LC y viceversa, sin embargo, juntos tienen un amplio potencial para mejorar el desempeño del proyecto de construcción. BIM permite obtener el modelo virtual con el más alto nivel de detalle posible que ofrece no solo detalles constructivos, si no la información que se requiere para adelantar la construcción con la seguridad de reducir a su mínima expresión la aparición de reprocesos por causa de diseños incompletos. De esta manera, LC hace uso de un proyecto detallado para desplegarse como un sistema de producción haciendo uso de los principios, las herramientas y construyendo una cultura alrededor del mejoramiento continuo.

La difusión de LC ha sido un esfuerzo inicial de un pequeño número de académicos del International Group for Lean Construction (IGLC) dedicados a formular una fuerte base teórica para LC. Esta teoría viene desarrollándose en pasos graduales con enfoque en los estudios de mejora de procesos de producción, planificación, estudios especializados, operaciones en el sitio de trabajo y especialmente en estudios de mejora de la gestión de producción en construcción. Se han publicado experiencias exitosas en implementación de LC en diversos países alrededor del mundo; sin embargo, como resaltan Aziz y Hafez (2013), aunque la implementación de LC se encuentra en avance, ya cuenta con cierta madurez que es importante conocer para intensificar su uso en beneficio de la productividad del sector.

La mejora de la productividad tiene una fuerte relación con el mejoramiento de la eficiencia y eficacia en el proceso de producción (Dahmus y Gutowski, 2005; Horta, Camanho, Johnes y Johnes, 2013), de tal manera que el desafío constante para el sector es la mejora de su productividad e innovación. Esto se traduce en entregar la oferta de valor con el mejor desempeño del sistema de producción.

2.1.2 Integración de Lean en el sector de la construcción

El término Lean es la denominación en Occidente de la producción japonesa de vehículos, como una consecuencia del estudio realizado por el Massachusetts Institute of Technology (MIT) en el marco del Programa Internacional de Vehículos de Motor en la década de 1990 (Womack, Jones y Roos, 1990). Este estudio mostró que el sistema de producción de vehículos desarrollado por Toyota Motor Company ofrecía un alto nivel de eficiencia y calidad que ubicaban a Toyota por encima de sus competidores occidentales. Al mismo tiempo, esta forma de producción utilizaba menos recursos, tiempo y dinero (Womack y Jones, 2003). Este sistema de producción se denominó Toyota Production System (TPS) y fue desarrollado por el ingeniero Taiichi Ohno en los años 50, después de la Segunda Guerra Mundial (Ohno, 1988), con la intención de lograr altos niveles de eficiencia, para responder a las restricciones del mercado japonés¹.

2.1.3 El Sistema de Producción Toyota (TPS)

El TPS se fundamenta en el desarrollo de una filosofía a largo plazo, que propicia el desarrollo de las personas en la organización, sus socios y proveedores, el aprendizaje y la mejora continua. Desde esa perspectiva se articula el mejoramiento del flujo de producción (Liker, 2011), a partir de principios agrupados en cuatro categorías, las cuales se muestran en las tablas 2.1, 2.2, 2.3 y 2.4. Este sistema puede ser aplicado a cualquier empresa y cualquier proceso de producción, ya sea en la industria o en servicios. Más adelante, se presentan los principios de Lean y Lean Construction, que, junto con los

¹ Un mercado pequeño con alta demanda de variedad de productos, al contrario de los mercados en Estados Unidos con altas demandas.

principios del TPS, se usan para fundamentar el desarrollo del modelo de evolución en el sentido de que gran parte de los atributos de madurez responden directamente al cumplimiento de estos principios.

1. Filosofía a largo plazo

Una empresa que comprende la posición que ocupa en el mercado y la sociedad, y busca alcanzar el más alto nivel en su sector (tabla 2.1).

Tabla 2.1. Principio 1 del TPS

Personas	Principio	Descripción
1	Las decisiones de gestión de la empresa deben estar basadas en una filosofía a largo plazo.	Para cumplir sus metas en el corto plazo, la empresa debe fijarse objetivos de largo plazo y trabajar, crecer y alinear las decisiones en torno a ellos.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

2. El proceso correcto producirá los resultados correctos

Estos principios están relacionados directamente con la eficiencia de la producción, con el mejoramiento del sistema de producción (tabla 2.2).

Tabla 2.2. Principios 2 al 8 del TPS

No.	Principio	Descripción
2	Establecer procesos en flujo constante para detectar problemas.	Lograr un flujo continuo en el proceso de producción con el que se busque reducir o eliminar el tiempo en el que un producto está parado y esperando continuar a la siguiente estación en su elaboración. Se busca crear un mayor flujo de productos e información, reducir el inventario, las esperas y evidenciar los problemas que interfieren el flujo de trabajo.
3	Evitar producir en exceso mediante sistema <i>pull</i> .	Implementar un sistema <i>pull</i> para reponer el material cuando se requiera, de esta manera se minimiza el material en inventario, manteniendo solo la cantidad estrictamente necesaria. Así, el sistema de producción es más flexible y se desarrolla según las demandas del cliente, ya sea interno o externo.
4	Nivelar la carga de trabajo.	Con este principio se busca reducir el trabajo en lotes. Esta forma de producción implica largos periodos de sobrecarga de producción seguidos de periodos de excesiva tranquilidad.

5	Parar para solucionar los problemas en el momento en que se detectan.	Desarrollar en las personas la confianza y el empoderamiento de parar un proceso cuando se detecte un error para solucionarlo inmediatamente y evitar elaborar productos defectuosos que lleguen al final del ciclo de producción.
6	Estandarizar como fundamento de mejora.	El establecimiento, la gestión y el mantenimiento de estándares permiten que se mantenga una forma de hacer el trabajo que contribuye a la eficiencia del sistema.
7	Usar el control visual para detectar problemas.	Los indicadores visuales ayudan a detectar rápida y fácilmente desviaciones o errores que afectan la calidad del producto.
8	Utilizar solo tecnología fiable y probada.	Hacer uso de tecnología que sea evaluada y estudiada antes de aplicarla para evitar que interfiera negativamente con los procesos de producción.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

3. Añada valor a la organización mediante el desarrollo de su personal

Estos principios están relacionados con las personas, con su crecimiento personal y profesional, lo que genera beneficio para la organización (tabla 2.3).

Tabla 2.3. Principios 9 al 11 del TPS

No.	Principio	Descripción
9	Promover el liderazgo.	Desarrollar personas y equipos excepcionales que sigan la filosofía de su empresa. Desarrollar líderes que comprendan perfectamente el trabajo, vivan la filosofía y la enseñen a otros.
10	Formar a los empleados para que sigan la filosofía.	Buscar la creación y promoción de una cultura que se extienda a todo el personal de la organización y que promueva el cumplimiento de los principios.
11	Ayudar a mejorar a sus socios y proveedores.	Respetar su red extendida de socios y proveedores, desafiándoles y ayudándoles a mejorar. Conseguir que los socios y proveedores utilicen los principios para impulsar la mejora continua y la calidad.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

4. La resolución continua de los problemas fundamentales impulsa el aprendizaje organizacional

Estos principios están relacionados con el mejoramiento de la producción (tabla 2.4).

Tabla 2.4. Principios 12 al 14 del TPS

No.	Principio	Descripción
12	Para comprender la situación hay que verla por sí mismo (Genchi Genbutsu).	Cuando se produzca un problema es necesario ir al foco, a la fuente y observar por qué se ha producido, verificando los datos <i>in situ</i> , en lugar de centrarse en información aportada por otras personas que pueden no reflejar la totalidad del escenario a estudiar.
13	Tomar decisiones considerando todas las opciones y actuar de forma rápida.	Tomar las decisiones por consenso lentamente, considerando concienzudamente todas las opciones e implementarlas rápidamente. Convertir la organización en una que aprende mediante la reflexión constante (Hansei) y la mejora continua (Kaizen).
14	Convertirse en una empresa que aprende.	Aprender de forma constante, de esta manera se convierte en un hábito.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

2.1.4 Lean Manufacturing

En 1996, Womack y Jones, mostraron en su libro *La máquina que cambió al mundo* cómo Toyota, una empresa que para la época era la mitad del tamaño que General Motors, pasó a ser el fabricante de automóviles más eficiente del mundo. Toyota mantiene su éxito en la actualidad basado en una adecuada combinación de sistemas de dirección, pensamiento y filosofía a largo plazo (Liker, 2011). Lean Production (LP), también denominado Lean Manufacturing, por su uso específico en la industria de manufactura, es una mirada diferente de la producción con procesos tradicionales, que busca satisfacer la demanda del cliente haciendo que el proceso de producción sea cada vez más eficiente al propiciar el mejoramiento continuo a través de la eliminación sistemática de desperdicios en todos los procesos de producción.

Lean integra los principios, la cultura y las herramientas de gestión y tecnológicas para entregar al cliente final el valor ofrecido con alta calidad, bajo costo y en el tiempo prometido. Esto se logra produciendo lo que el cliente final requiere, cuando lo quiere, donde lo quiere y a un precio justo. En este sentido, de acuerdo con Womack y Jones (2003), son cinco principios fundamentales para desarrollar el pensamiento Lean. Al seguir paso a paso estos principios se obtiene el máximo beneficio de su aplicación (Aziz y Hafez, 2013), un alto nivel de servicio, y al mismo tiempo se es capaz de adaptarse a un entorno cambiante. Los principios Lean Manufacturing se presentan en la tabla 2.5.

Tabla 2.5. Principios Lean Manufacturing

No.	Principio	Descripción
1	Especificar el valor del punto de vista del cliente.	Especificar el valor a partir del entendimiento de las necesidades del cliente y su propia concepción de valor. Se identifican, en el proceso de producción, las actividades que agregan valor en la obtención del producto o servicio se sirven a los requerimientos del cliente. Se reconoce que solo una pequeña fracción del tiempo y esfuerzo en cualquier organización agrega valor para el cliente final. Al definir claramente el valor desde la perspectiva del cliente final, las actividades sin valor –o desperdiciadoras– son objeto de eliminación.
2	Identificar y mapear la cadena de valor.	Después de entender los deseos y necesidades del cliente, se identifica cómo se va a entregar (o cómo no se va a entregar) el producto o servicio. La cadena de valor se compone de las actividades que deben ser ejecutadas en todas las áreas de la organización para entregar el producto o servicio prometido. Sin embargo, muchas de las tareas involucradas en esta cadena no agregan valor por el cual el cliente estaría dispuesto a pagar. Al crear el mapa del flujo de valor, se identifican todas las actividades en la cadena de valor: las que agregan y las que no agregan valor. Con el conocimiento del mapa de valor, se identifican las actividades a eliminar y aquellas que se deben reducir a fin de mejorar el flujo.
3	Optimizar el flujo, a través de los pasos que agregan valor, eliminando el desperdicio.	Hacer que los pasos de creación de valor se produzcan en secuencia, de tal forma que el producto fluya sin interrupciones ni sobresaltos hacia el cliente. Se debe asegurar que haya un flujo continuo en los procesos y la cadena de valor. Enfocarse en el proceso y no en el producto final. Sin embargo, el flujo nunca será óptimo hasta que se especifique el valor de acuerdo con el cliente, y se identifique la cadena de valor.
4	Permitir que el cliente utilice el sistema cuando lo necesite. Cambiar <i>push</i> por <i>pull</i> .	Se trata de comprender la demanda de los clientes en su producto o servicio y luego crear un proceso que responda efectivamente a esta, de tal manera que se produzca solo lo que el cliente requiere. O sea, producir solo lo que se necesita de acuerdo a la demanda real, más que a la pronosticada, tirar del proceso de producción (<i>pull</i>) en lugar de empujar (<i>push</i>). De esta manera se produce exactamente lo que el cliente quiere en el momento que lo necesita. La idea es reducir la producción innecesaria y utilizar la herramienta de gestión “Just In Time”.
5	Mejorar siempre, buscando la perfección.	Buscar que el número de pasos y la cantidad de tiempo e información necesarios para llegar al cliente vaya disminuyendo continuamente. Tiene como objetivo la solución perfecta y mejoras continuas. Entregar un producto a los clientes que está a la altura de las necesidades y expectativas, dentro de la programación de tiempo acordado y en perfecto estado, sin errores ni defectos. La única manera

No.	Principio	Descripción
		de hacerlo es tener una comunicación estrecha con el cliente, así como los administradores y los empleados son el medio. Crear el flujo y establecer <i>pull</i> comienza con reorganizar radicalmente diferentes pasos del proceso, pero los beneficios son verdaderamente significativos, ya que todos los pasos se enlazan. Mientras esto sucede, los desperdicios se hacen visibles y el proceso continúa hacia el punto final teórico de la perfección, donde cada activo y cada acción agregan valor para el cliente final.

Fuente: elaboración propia basada en el TPS (Liker, 2011).

2.1.5 Lean en la construcción

Lean Construction se propone como una reconceptualización de la producción en el sector de la construcción. Toma como fundamento la producción en manufactura desarrollada con el enfoque Lean Production, el cual está basado en el Sistema de Producción Toyota (Toyota Production System [TPS, por sus siglas en inglés]). Lean se enfoca en la creación de valor y en la eliminación del desperdicio. El modelo de producción tradicional ha sido desarrollado como un proceso que convierte insumos en productos o servicios. Este modelo solo considera las actividades de conversión como actividades que agregan valor y no tiene en cuenta las actividades de flujo (aquellas que no agregan valor, pero que son necesarias para llevar a cabo la transformación). La producción Lean se enfoca en entender el valor desde el punto de vista del cliente y de esta manera hacer que el sistema de producción se alinee con estos requisitos de valor y busque la satisfacción de las necesidades precisas de los clientes. En el proceso se van reduciendo y eliminando sistemáticamente, según sea el caso, las actividades que no agregan valor, pues se busca aumentar la eficiencia de las actividades que agregan valor (Shingo, 1992).

La construcción Lean es la manera de implementar el TPS en el sector de construcción, ya que es muy importante darle una connotación como un tipo de producción (Bertelsen, 2004). A partir de esta investigación se propone a la comunidad LC un nuevo principio: el cumplimiento de la oferta de valor. Pero LC no es solo un sistema de producción más eficiente a partir del cumplimiento de los principios propuestos por Koskela (1992), tiene la capacidad de integrar sistemáticamente aspectos que contribuyan a que las personas y

la organización crezcan en el desarrollo del sistema en todos los aspectos relacionados con la producción.

La industria de la construcción está valorando altamente la integración de LC como un enfoque con muchas ventajas para el medio ambiente construido (Nesensohn y Bryde, 2012). Se trata de una novedosa manera de entrega de proyectos, más adecuada para proyectos con altos niveles de complejidad como los de construcción (Ballard y Howell, 1997; Howell, 1999). En este sentido Koskela (1992), establece como uno de los principios LC “Aumentar del valor de salida a través de la consideración sistemática de las necesidades del cliente” (p. 18).

De otra parte, esta investigación expone que más que la creación de valor, Lean debe enfocarse en el cumplimiento de la oferta de valor. Este aún no es un concepto visible en la literatura, dado que un sistema que responde al cumplimiento de la oferta de valor podría ajustarse más fácilmente a una oferta de valor más exigente. De esta manera, se desarrolla conceptualmente el SLC-EModel, el cual busca identificar el actual nivel de madurez del sistema de producción para identificar la forma de mejorar el proceso de producción en función de la mejora del cumplimiento de la oferta de valor.

2.1.6 Lean Construction

El mejor desempeño de las empresas manufactureras y de servicios que han aplicado Lean propició que se considerara estudiar su aplicabilidad en construcción. Koskela (1992) fue quien presentó los primeros argumentos para su utilización en construcción. Él estudió el desarrollo de Lean en manufactura y propuso su aplicación a la construcción mediante un proceso de producción en construcción desarrollado a partir de la teoría TFV de la producción, o teoría de transformación, flujo y valor, en la que los tres elementos deben ser gestionados simultáneamente.

Más adelante, Bertelsen (2017) propone usar el concepto *operación* en lugar de *transformación*, y cambiar el orden de los elementos de la teoría: *valor, operación y flujo*. En esencia, no se sugiere un cambio en la teoría del TFV, sino que es una manera de acercar la construcción a un proceso más industrial de la producción bajo principios de Lean Production aplicados a la construcción. Koskela (citado en Bertelsen, 2017) elige el

uso de la palabra *transformación* por razones históricas. Bertelsen (2017), sin embargo, resalta que Shingo (1992) utiliza el concepto *operación*, ya que considera las actividades contributivas como elementos del proceso mismo, su uso ofrece una perspectiva más amplia en términos de la producción. Y dado que la creación de valor es lo más importante en el proyecto, renombra la teoría del TFOV de Koskela (1992) como la teoría de Valor-Flujo-Operaciones, o teoría VFO.

La creación de valor es un proceso en el cual se consultan las expectativas del cliente para que, a través del diseño del proceso de producción, se entregue al cliente aquello por lo que está dispuesto a pagar. Se busca que este ejercicio genere beneficios para el crecimiento continuo y sostenido de la organización. El flujo mueve el producto de un estado de elaboración al siguiente para ser transformado según las operaciones. En las operaciones se identifican las actividades productivas, contributivas y los desperdicios, de tal manera que para cada una de ellas se persiguen objetivos diferentes: mejorar continuamente la eficiencia de las actividades productivas, reducir y mejorar las actividades que no agregan valor y que son necesarias para la producción de aquellas que sí agregan valor, y eliminar las actividades desperdiciadoras.

Lean se centra en la eliminación continua y sostenida de desperdicios, los cuales no agregan valor y obstaculizan el flujo de producción. Un desperdicio es todo aquello, adicional a lo mínimo necesario para fabricar un producto o prestar un servicio. Estos mínimos necesarios corresponden a materiales, equipos, personal, tecnología, etc. Los desperdicios compiten por recursos que pueden ser mejor aprovechados principalmente en el mejoramiento de las actividades que agregan valor; asimismo, corresponden a actividades de flujo que no agregan valor al cliente. Se identifican diez tipos de desperdicios:

1. **Esperas**, tiempos de inactividad por inadecuada sincronización del trabajo, no disponibilidad de materiales o falta de espacio para trabajo.
2. **Productos defectuosos**, o materiales o servicios que no cumplen con las expectativas o con las especificaciones,
3. **Sobreproducción**, la fabricación de artículos en mayor cantidad que las requeridas por el cliente. Producir más de lo demandado antes de que sea necesario,

4. **Inventarios en exceso** o innecesario que conduce a pérdidas de material y monetarias la no utilización del capital. Se manifiesta en el excesivo almacenamiento de materia prima o materiales, producto en proceso y producto terminado,
5. **Sobre procesamiento**, pasos innecesarios en las operaciones de producción que no añaden valor,
6. **Movimientos innecesarios**, desplazamientos físicos de productos o materiales que realice el personal que no agregue valor,
7. **Transportes innecesarios**, de productos, materiales, personas, equipos de un lugar de a otro hasta realizar la producción,
8. **Talento de las personas no utilizado**, se refiere a no aprovechar la creatividad e inteligencia de las personas para el proceso de producción, sus competencias, potencial entender los problemas, eliminar desperdicios y propiciar la mejora continua,
9. **Making Do**. Esta categoría de desperdicio fue identificada por Koskela (2004). Se considera una de las principales fuentes de desperdicio en construcción. Se presenta cuando se comienza una tarea sin tener disponibles todos los insumos y requerimientos necesarios para ser completada, o la ejecución de la tarea continua, aunque la disponibilidad de al menos un insumo o requerimiento haya cesado.
10. **Improvisación**. Aparece cuando las personas usan cualquier solución que tengan a mano para alcanzar las metas llegando hasta redefinir objetivos y alcances de acuerdo con los recursos disponibles (Vera y Crossan, 2004). Es importante entender que *Making Do* e *improvisación* no se refieren a una misma categoría de desperdicio, aunque tienen elementos que pueden ser considerados comunes.

Como mencionan Formoso, Sommer, Koskela e Isatto (2011), *Making Do* tiene una fuerte correlación con el concepto de *improvisación*, aunque no son lo mismo. En la literatura se discute el concepto de *improvisación* como una práctica humana altamente estructurada y se resalta como una fuente importante de mejoras e innovación (Ciborra y Hanseth, 1998; Moorman y Miner, 1998; Verjans, 2005). Sin embargo, estos autores no consideran que la improvisación sea una fuente de desperdicio. La improvisación se

conoce también como *bricolage* (Hamzeh, Morshed, Jalwan y Saab, 2012), y en su desarrollo no se tiene tiempo para hacer un adecuado uso de los recursos, de ahí la evidencia para considerarla un desperdicio.

2.1.7 Definición de Lean Construction

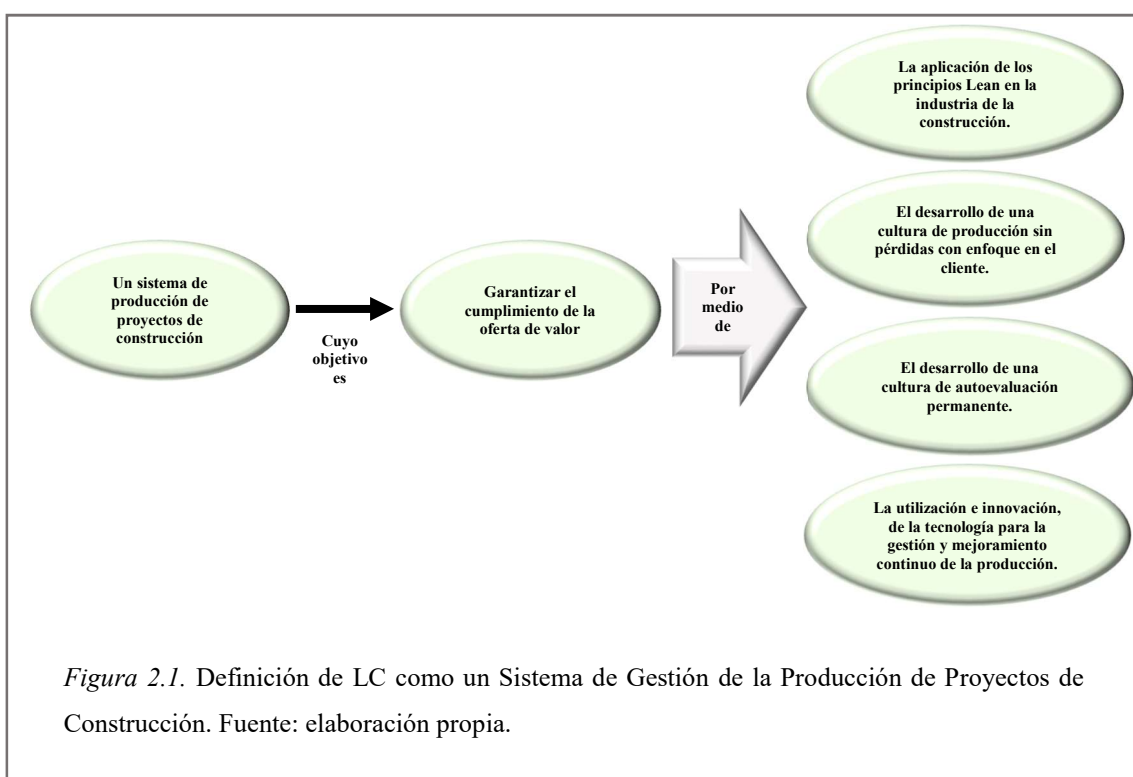
De acuerdo con Koskela, Howell, Ballard y Tommelein (2002), “LC es una manera de diseñar sistemas de producción para minimizar el desperdicio de materiales, tiempo y esfuerzo con el fin de generar la máxima cantidad posible de valor” (p. 211). Entonces, considerando que no se identifica en la literatura una definición más precisa de LC, a pesar de que se cuenta con el trabajo de Mossman (2018), quien ha realizado una compilación de definiciones y un estudio a nivel de encuesta con expertos buscando esta definición. Para este autor, “Lean es una colección práctica de teorías, principios, axiomas, técnicas y formas de pensar que juntas y severamente pueden ayudar a individuos y equipos a mejorar los procesos y sistemas dentro de los cuales trabajan” (p. 11).

Basada en diferentes autores como Nesensohn *et al.* (2014), Koskela y Howell (2002), Ballard y Tommelein (2012), Bernstein y Jones (2013) y Mossman (2018), la investigadora ha desarrollado la siguiente definición que considera a LC un sistema de producción:

Definición para Lean Construction

Lean Construction es un Sistema de Gestión de la Producción de Proyectos de Construcción, cuyo objetivo es garantizar el cumplimiento de la oferta de valor por medio de (a) la aplicación de los principios de la producción Lean en la industria de la construcción, (b) el desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas, con enfoque en el cliente, y de autoevaluación permanente, y (c) la utilización e innovación de la tecnología para la gestión y mejoramiento continuo de la producción (figura 2.1).

Esta definición adquiere importancia para el desarrollo de esta tesis, pues en ella se entiende la construcción como un proceso sistémico de producción. La investigadora considera que, en este marco, esta definición podría ser estudiada por el cuerpo académico de LC para ser integrada a la discusión de una definición para LC. Guarda importancia disponer de una base conceptual para reducir imprecisiones sobre lo que es y no es LC. Esta definición se enfoca en LC como un sistema de producción basado en principios y de esta manera integrar las herramientas y construir esa cultura que garantice la sostenibilidad de la implementación en el tiempo.

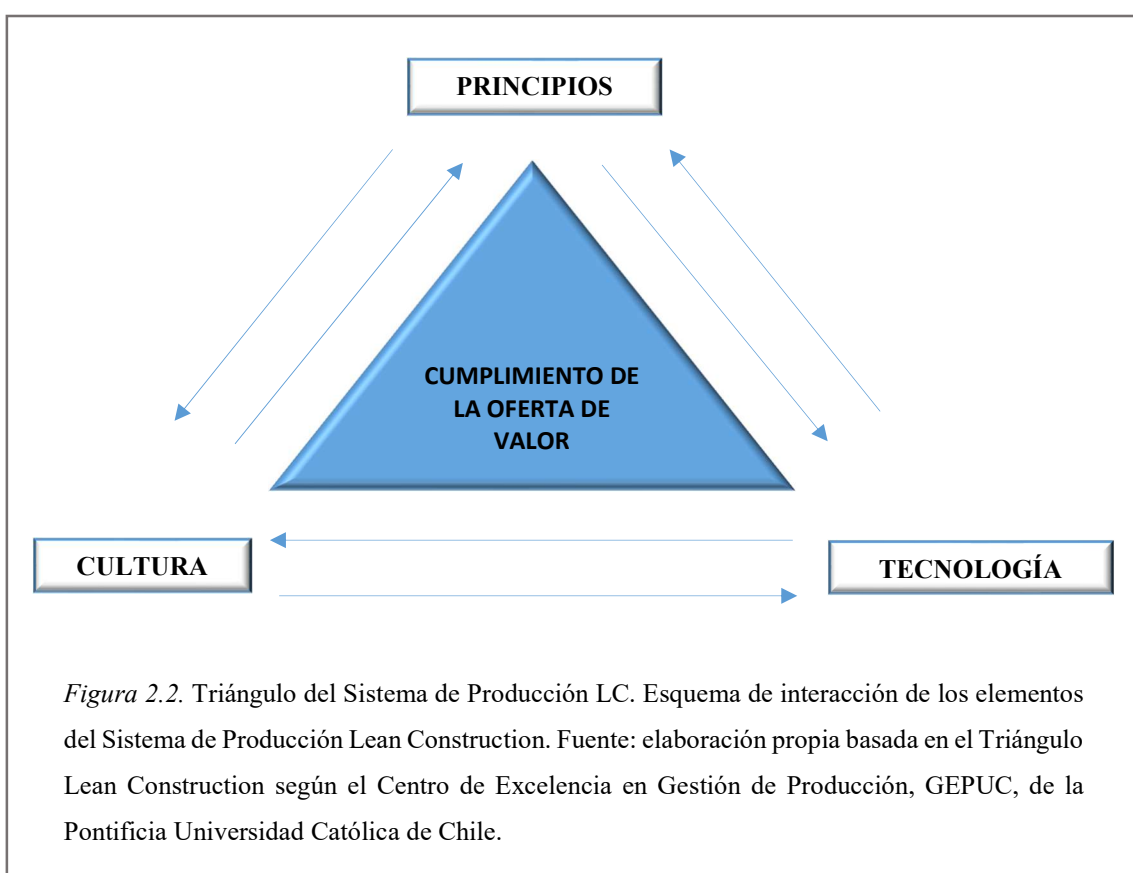


2.1.8 Triángulo del sistema de producción LC

La figura 2.2 muestra la relación entre aspectos fundamentales de LC en la producción del proyecto de construcción: (a) los principios LC que mueven el sistema; (b) la cultura que permite que las personas aprendan, se capaciten y se entrenen constantemente para soportar el sistema, sean valoradas, respetadas y cuidadas en el desarrollo de su trabajo,

que sean personas motivadas y empoderadas; y (c) la tecnología, que implica su uso apropiado para apoyar el trabajo.

Tomando como base el triángulo de LC propuesto por el Centro de Excelencia de Gestión de Producción de la Universidad Católica de Chile (GEPUC), esta investigación considera que la relación entre los tres aspectos se debe centrar en el cumplimiento de la oferta de valor, el cliente como elemento central. LC, como sistema de producción, es a la construcción lo que el TPS es al sistema de producción para Toyota.



Este sistema de producción debe propiciar el desarrollo de una cultura que piense constantemente en la eliminación de pérdidas, una cultura que aprenda y cree estrategias basadas en la solución de problemas y el mejoramiento continuo. Es una cultura fundamentada en principios del TPS que propician el desarrollo de las personas y el crecimiento organizacional con enfoque en el cliente. Finalmente, el uso de la tecnología contribuye, junto con los otros dos conceptos, a mejorar la eficiencia del proceso de

producción del proyecto y la productividad de la organización. El sistema de gestión de la producción LC integra, de manera complementaria, principios del TPS que le son pertinentes. A continuación, se explican con más detalle los tres aspectos que conforman el triángulo del sistema de producción LC: principios, cultura y tecnología.

2.1.8.1 Principios – Los principios que movilizan la producción

Son 11 los principios propuestos por Koskela (1992) a partir de los cuales ha venido creciendo el interés de los practicantes e investigadores en LC (Aziz y Hafez, 2013), dado que se enfocan en una producción más eficiente en la construcción. Posteriormente, Sacks, Koskela, Dave y Owen (2010) estudiaron la relación entre LC y el Building Information Modeling (BIM) para concluir que, a pesar de ser iniciativas muy diferentes, ambas impactan fuertemente la industria de la construcción. Sin embargo, reviste importancia considerar en el desarrollo del sistema de gestión de producción LC, los principios relacionados con las personas, la organización y selección y uso de la tecnología resultado de los beneficios BIM.

Del trabajo de Sacks, Koskela, Dave y Owen (2010) se ampliaron de 11 principios de LC a 16 principios LC-BIM, que propenden a la mejora de la eficiencia del proyecto de construcción, como el propósito fundamental de LC. En este trabajo, los autores, construyen una matriz que integra las funcionalidades BIM con los 16 principios de LC –BIM, los cuales fueron desplegados en 24 elementos que los hacen operativos detallando guías para su aplicación (Sacks *et al.*, 2010).

Para esta investigación, la matriz guarda un particular interés debido a que la mayoría de sus elementos están considerados en el desarrollo del SLC-EModel, ya sea como factor de madurez, atributo o característica que componen los atributos. Estos elementos están incluidos en los identificados en la revisión de las referencias bibliográficas y en las entrevistas con expertos. Desde el punto de vista de estos autores, estos principios movilizan la producción y con relación a esta investigación, ellos forman parte del modelo propuesto.

Adicionalmente, a partir de la selección de los elementos para esta investigación, se evidencia un agrupamiento particular de elementos en conceptos que podrían constituirse

como principios, por lo cual se sugieren cuatro elementos para que sean integrados como principios LC:

- Desarrollo, uso y mantenimiento de estándares.
- Conocimiento, selección y uso apropiado de herramientas LC.
- Desarrollo de un sistema pull.
- Cumplimiento de la oferta de valor.

Un Sistema de Gestión de la Producción LC considera, además de los procesos de transformación, los procesos relacionados con el flujo de materiales y de información (Koskela, 1992), así como los procesos de la organización que soportan la producción. Los atributos clave de los procesos de flujo de producción son tiempo, costo y valor. En este caso, el valor se refiere al cumplimiento de los requisitos del cliente. En general, todas las actividades gastan costo y consumen tiempo, pero solo las actividades de transformación agregan valor. Lean, en general, busca que las actividades de conversión sean más eficientes y se reduzcan o eliminen las actividades que no agregan valor. Por lo tanto, para mejorar la eficiencia global de un proceso de producción en la ejecución del proyecto, el esfuerzo se concentra en la reducción o eliminación de las actividades de flujo, en tanto se busca que las actividades de transformación sean más eficientes.

El proceso de producción de un proyecto de construcción es complejo debido a la interacción entre diferentes áreas del sistema de producción, de la organización y las personas mismas que interactúan, todos ellos con objetivos contrarios a pesar de desarrollar el mismo objetivo general, el proyecto. De ahí que el establecimiento de principios que direccionen el desarrollo del sistema de producción en construcción hacia un mejor desempeño, establecen los parámetros de entendimiento de lo que implica la implementación de LC (Despradel *et al.*, 2011). Los principios LC están propuestos de acuerdo con el modelo de TFV de Koskela (1992), Martínez, González y Fonseca (2009), quienes plantearon una manera de agruparlos en tres categorías: (a) mejoramiento de procesos, (b) reducción o eliminación de desperdicios, y (c) enfoque en el cliente; además, consideran estas categorías como los pilares asociados a la implementación de LC.

A partir de esta investigación, la autora propone una novedosa forma de agrupar los 11 principios de LC, planteados por Koskela (1992), en dos factores, de tal manera que se

muestre la relación de dichos principios con la producción. Estos grupos se denominan: Mejoramiento del Sistema de Producción y Mejoramiento de la Producción (tablas 2.6 y 2.7). Esta forma de agrupación permite alinear los procesos y servicios de la organización para ofrecer a los clientes aquellos aspectos del producto por los cuales están dispuestos a pagar. Consiste en asegurar que todos los aspectos de la empresa se desarrollan en función del cumplimiento de la oferta de valor.

- **Mejoramiento del Sistema de Producción**

El sistema de producción se diseña de acuerdo con los requisitos de valor que deben ser integrados al producto y que responden a las expectativas del cliente final. Son siete principios LC que contribuyen a disponer de un mejor sistema de producción (tabla 2.6).

Tabla 2.6. Principios LC asociados con el Mejoramiento del Sistema de Producción

Principio	Descripción
Aumentar la flexibilidad de salida.	Se trata de reducir los tamaños de lote para asemejarse a la demanda, reducir la dificultad y el tiempo para realizar diferentes configuraciones y cambios en la producción, lograr que la personalización sea lo más tarde posible en el proceso y formación de una fuerza de trabajo polivalente.
Reducir el tiempo de ciclo.	El tiempo de ciclo es el tiempo requerido para que una pieza particular de material atraviese el flujo. El tiempo de ciclo considera tiempo de procesamiento, tiempo de inspección, tiempo de espera y tiempo de movimientos. Entonces se busca comprimir el tiempo de ciclo, lo que obliga a la reducción de inspecciones, movimientos y tiempos de espera.
Reducir la variabilidad.	Los procesos de producción son variables, sin embargo, se busca disponer de productos uniformes. Adicionalmente, la variabilidad en la duración de ejecución de una actividad aumenta el volumen de actividades que no agregan valor. Así que la reducción de la variabilidad dentro de los procesos debe ser un objetivo.
Enfoque en el control del proceso completo.	Se busca eliminar el flujo segmentado, lo que ocasiona suboptimización de recursos. El control en el proceso completo contribuye a una mejor eficiencia de los recursos utilizados en la producción y se dispone de una autoridad de control para el proceso completo.
Simplificar, minimizar el número de pasos, partes y eslabonamientos.	La simplificación corresponde a la reducción del número de componentes en un producto y la reducción del número de pasos en un flujo de material o información. Se puede realizar eliminando actividades que no agregan valor y reconfigurando el proceso en la etapa que agrega valor.

Principio	Descripción
Aumentar la transparencia del proceso.	El proceso de producción se hace transparente para facilitar el control y la mejora haciendo que el proceso sea directamente observable a través tanto de medios organizativos o físicos, mediciones como de la exhibición pública de la información.
<i>Benchmarking</i>	Se conocen procesos de clase mundial para reconfigurar los procesos de producción de la organización, incluidos los procesos de apoyo a la producción.

Fuente: elaboración propia basada en Koskela (1992).

• Mejoramiento de la Producción

Este grupo de principios se enfoca en la mejora continua de la producción misma. Lograr cada vez un mejor desempeño del sistema, al considerar los elementos clave que influyen en la entrega del producto (tabla 2.7).

Tabla 2.7. Principios LC asociados con el Mejoramiento de la Producción

Principio	Descripción
Aumentar el valor de salida a través de la consideración sistemática de las necesidades del cliente.	Crear valor mediante el cumplimiento de los requisitos del cliente y no solo debido a la transformación. Para cada actividad hay dos tipos de clientes, las actividades próximas y el cliente final. El enfoque práctico para este principio es llevar a cabo un diseño de flujo sistemático, donde los clientes se definen para cada etapa, y se analizan sus requisitos.
Aumentar la eficiencia de las actividades que agregan valor.	En la mejora de las actividades productivas, las transformaciones y los flujos deben ser direccionados. Para cualquier proceso de producción, los aspectos de flujo y de transformación tienen cada uno un potencial diferente de mejora. El potencial de mejora de flujo es generalmente más alto que la mejora de la transformación se puede iniciar con inversiones más pequeñas, pero por lo general requiere un tiempo más largo que una mejora de la transformación. Perseguir agresivamente la mejora de procesos de flujo antes que grandes inversiones en nueva tecnología de transformación.
Construir una mejora continua en el proceso.	El esfuerzo para reducir los desperdicios y aumentar el valor es una actividad interna, incremental e iterativa, que puede y debe llevarse a cabo de forma continua.
Reducir la proporción de actividades que no agregan valor	Las actividades que no agregan valor dominan la mayoría de los procesos. Algunas de las actividades que no agregan valor, generan valor para los clientes internos, por lo que no deben ser suprimidas sin tener en cuenta si estas actividades que no añaden valor son importantes en otras partes del proceso.

Fuente: elaboración propia basada en Koskela (1992).

- **Otros principios a considerar**

Otros principios a tener en cuenta en el Mejoramiento de la Producción como resultado de esta investigación son propuestos por la autora para ser considerados como principios Lean Construction, estos se muestran en la tabla 2.8. Adicionalmente, esta investigación identificó elementos de madurez relacionados con los principios desplegados por Sacks *et al.* (2010), los cuales están asociados a los atributos que forman parte del modelo de madurez, como se verán integrados a los atributos y características del SLC-MM.

Tabla 2.8. Otros principios propuestos para ser considerados en LC

Principio	Descripción
Desarrollo, uso y mantenimiento de estándares.	Se trata de diseñar, redactar y esquematizar, mejorar y sostener la manera en que se desarrollan los procesos, de tal manera que sirvan de base para su ejecución y mejoramiento continuo. Disponer de un estándar contribuye con la obtención de la calidad del producto o servicio. También contribuyen con la seguridad en el trabajo y el mejoramiento del flujo.
Conocimiento, selección y uso apropiado de herramientas LC.	Hay un set de herramientas LC disponibles que se van implementando en el sistema de producción. Esto considera que el equipo de trabajo cuenta con la capacidad de seleccionar la herramienta adecuada al identificar la necesidad de su uso. Guarda importancia que los equipos de trabajo conozcan la herramienta y la utilicen correctamente.
Desarrollo de un sistema <i>pull</i> .	El sistema <i>pull</i> pone en movimiento la producción en la medida en que la demanda requiera del producto o el servicio. Se produce si existe demanda y se requiere de los procesos de fabricación que hacen posible la elaboración de dicho producto o servicio.
Cumplimiento de la oferta de valor.	Uno de los principios LC especifica: “Aumentar el valor de salida a través de la consideración sistemática de las necesidades del cliente” (Koskela, 1992). Sin embargo, se debe considerar la entrega del valor ofrecido, buscar que la brecha entre el valor especificado y el valor entregado sea cada vez más pequeña, de ahí que el cumplimiento de la oferta de valor sea un principio asociado con el proceso de producción.

Fuente: elaboración propia.

2.1.8.2 Cultura - Desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas con enfoque en el cliente

El éxito de la utilización de LC depende de manera crítica del compromiso de las personas, del cambio de las tradiciones y la cultura (Sarhan y Fox, 2013a). Son las personas quienes llevan a cabo las estrategias de implementación, asumen el liderazgo y el compromiso para realizar una implementación LC exitosa y sostenible en el tiempo. La cultura recoge la experiencia y manera de realizar el trabajo con las especificidades de

la organización, que normalmente está influenciada por el sector productivo en que se desarrolla.

Al respecto, Mann (2005) describe que “la cultura en una organización es la suma de los hábitos de las personas en relación con la forma en que realizan su trabajo” (p. 3). En trabajos recientes sobre las barreras que se oponen a la implementación de LC (Cano, Delgado, Botero y Rubiano, 2015a; Mano, Lima, Costa y Cano, 2018) se demuestra que una de las más fuertes es la “resistencia al cambio”, como un elemento de la cultura de la organización, en la cual se basan las personas para sustentar lo que se puede o no hacer en ella. Mann (2005) explica que es un error considerar que, para transformar los procesos de producción, una empresa se enfoque solamente en cambiar la cultura, y, por el contrario, sugiere que el cambio sea el resultado de su sistema de gestión, de aprender de lo que se experimenta en la organización a partir de este sistema de gestión. La cultura es fundamental, y para cambiarla, debe cambiar el sistema de gestión y no pretender realizar el cambio de otra forma, de lo contrario, el cambio no sería sostenible.

Basado en Rivera (2016), para lograr un cambio efectivo en la cultura organizacional, las personas deben estar convencidas, a partir de la experiencia en el desarrollo del sistema de gestión, de que los objetivos pueden ser alcanzados, que conceptos como liderazgo, compromiso y cooperación contribuyen al crecimiento personal mientras la organización también crece. Las personas dentro de la organización deben ser conscientes del valor que se agrega al cliente en cada uno de los procesos que se llevan a cabo en la organización. Se trata de entender que el sistema de producción se diseña tomando en cuenta los requisitos de valor del cliente para garantizar el cumplimiento de la oferta de valor. Se promueve entonces una cultura que entiende el valor de un proceso más eficiente, una cultura que persigue constantemente la eliminación de actividades desperdiciadoras y que cree que el mejoramiento continuo es el medio para buscar la eficiencia del sistema de producción, agilizar el flujo de producción y la producción misma.

Al obtener un claro entendimiento del valor que se agrega al cliente por cada uno de los procesos en el sistema de producción, el concepto de cliente interno adquiere particular relevancia para el desempeño del sistema de producción, pues todas las acciones van

dirigidas a satisfacer las expectativas del cliente. De esta manera es importante no solo conocer las necesidades y expectativas del cliente, si no, precisar los requerimientos relacionados con el trabajo a realizar. El cliente interno corresponde a cada una de las personas en el sistema de producción que demandan bienes y servicios de procesos aguas arriba de su ubicación en la cadena de valor. Esto implica que el proceso que entrega estos bienes o servicios conozca las necesidades del proceso que se entrega - cliente interno- el cual luego de realizar su trabajo entrega al proceso siguiente. (Rivera, 2016)

Como lo describen Ozkan et al (2017) en su trabajo, los clientes internos son uno de los capitales más valiosos de la organización. Tanto el nivel de satisfacción del cliente interno, su cualificación y actitud, entre otros aspectos, afectan directamente el desempeño organizacional. En este sentido, el desperdicio de talento es una actividad sin valor agregado y debe eliminarse de la organización para ser más ágil. Sugieren los autores, que la organización debe realizar una cuidadosa selección de las personas de manera que puedan ser ubicadas en las posiciones de trabajo correctas al contar con una clara descripción del trabajo tanto para la contratación como para su desempeño.

2.1.8.3 Tecnología - Utilización e innovación en el uso de la tecnología para la gestión y mejoramiento de la producción

Tecnología, según el *Diccionario de la lengua española* (RAE, 2014), es el “conjunto de teorías y de técnicas que permiten el aprovechamiento práctico del conocimiento científico”; también se define como un “tratado de los términos técnicos”; “lenguaje propio de una ciencia o de un arte”, o como el “conjunto de los instrumentos y procedimientos industriales de un determinado sector o producto”.

En este sentido, la tecnología no es la aplicación de dispositivos, máquinas o herramientas, es la utilización del conocimiento en la forma de teorías y técnicas que permiten su aplicación para la solución de problemas y la satisfacción de necesidades específicas. Lean resalta la importancia de lograr mejoras en el sistema de producción a partir de la mejora continua de los procesos, involucrando sistemáticamente herramientas que vayan siendo aprendidas y utilizadas por las personas en los diferentes procesos.

2.1.9 Enfoque sistémico de Lean Construction

De acuerdo con Guirette y Arroyo (2011), el pensamiento sistémico (PS) permite adquirir una visión más crítica en razón a que permite una visión holística y de la complejidad de la realidad, la cual considera múltiples elementos y sus interrelaciones. Así, se cambia la manera de entender los problemas, pasar de una visión lineal de los niveles de pensamiento (literal, inferencial y crítico) a una visión circular de estos, los cuales permiten la realimentación, transformación y construcción constantes.

En 1956, Forrester propuso el uso del PS para el desarrollo de modelos administrativos. El PS es muy flexible, no da lugar a conclusiones determinísticas y cerradas al considerar una sola parte del problema, considera todas las relaciones entre los elementos en interacción, en otras palabras, es necesario “ver el bosque y no solo el árbol”. Este es el marco para analizar interrelaciones en lugar de elementos de manera individual y con base en estos conceptos, desarrolla la dinámica de sistemas (DS). La DS es una herramienta que ayuda a comprender procesos complejos. Deming (1994), defiende que los procesos administrativos deben verificar la forma como ellos mejoran continuamente en ciclos de retroalimentación constantes, de igual manera debe poder ver todas las partes del sistema organizacional y cómo estas interactúan entre sí, considerando todos los elementos que entran y salen de los procesos y los factores internos y externos que influyen en el sistema. En los años 90, Senge, Klieiner, Roberts, Ross y Smith (1994) propusieron cinco disciplinas para el desarrollo organizacional en las empresas inteligentes, la quinta es el PS, el cual integra las otras cuatro disciplinas como un sistema dinámico que impulsa la comprensión de la complejidad en el desarrollo organizacional. Estas disciplinas son:

- **Maestría personal:** La gente con alto dominio personal alcanza las metas que se propone.
- **Trabajo y aprendizaje en equipo:** Pensar juntos para tener mejores ideas.
- **Reflexión y conversación:** Identificar y desarrollar nuestros modelos mentales.
- **Visión compartida:** Las visiones personales alimentan la visión de la organización.
- **Pensamiento global:** Generar pensamiento sistémico.

El éxito en las organizaciones depende de lograr la adecuada interacción entre factores clave para alcanzar el objetivo global y el PS es una herramienta apropiada. El PS usa modelos y mapas mentales (Guirette y Arroyo, 2011), estos son formas o patrones básicos de percibir, pensar, valorar y actuar con base en una visión particular de la realidad. Una versión flexible de un modelo mental se logra integrando diferentes criterios como educación, valores, religión, moral, cultura, experiencia, costumbres, personalidad, etc. Con esta información integrada, se construyen posturas y se desarrollan actitudes con respecto de la realidad estudiada.

De acuerdo con lo anterior, para procurar un mejor desempeño de la GPC con el uso de LC, se pueden considerar estrategias con enfoque sistémico que impacten directamente el cumplimiento de la oferta de valor, como lo es el modelo de evolución, el SLC-EModel. En la medida que se logre hacer más flexibles los modelos mentales, se viabiliza la utilización de técnicas que rompan con los métodos tradicionales de gestión. Esto se hace involucrando a las personas en la problemática particular. Con esto se busca romper con el uso y las costumbres propias de la construcción tradicional, y propiciar en las personas el interés de llevar sus procesos de pensamiento a niveles más elaborados y a ser generadores de su propio conocimiento. Esto implica hacer una transformación de los procesos de pensamiento en la construcción y ser capaces de identificar indicadores que realmente sean consistentes con el objetivo global y enfocar esfuerzos para que sea alcanzado (Rivera y Manotas, 2014).

2.1.10 ¿Qué es una gestión Lean de producción de proyectos de construcción?

Una gestión Lean debe considerar el engranaje de todos los elementos que participan del proceso de producción de proyectos de construcción. El articulador es el valor, especificado a partir de los requisitos e intereses del cliente. Una vez se identifica el valor, se configura la oferta de valor y el sistema de producción se ajusta a las condiciones que permitan crear y entregar el valor ofrecido. En este estudio se insiste que el sistema de producción debe ser ajustado para cumplir estrictamente con la oferta de valor, ni más ni menos. Así que, no es suficiente incrementar el valor a la salida del proceso, la creación de valor en sí misma pone en funcionamiento los procesos de producción, sin embargo,

se busca la eficiencia de estos procesos para garantizar el cumplimiento de la oferta de valor.

No es suficiente identificar la cadena de valor y eliminar las pérdidas. Es innegable que este es el fundamento de Lean, no obstante, subyacen otros criterios que involucran a las Personas y a la Organización, siendo muy relevante la gestión eficiente de la información, es decir, disponer de sistemas de información y tecnologías de comunicación como soporte del desarrollo de la GPC. La gestión en una fase temprana del proyecto de construcción es considerada el factor más importante relacionado con la productividad laboral en construcción (Maloney, 1983). La principal característica asociada con la gestión, que se recomienda abordar en procesos de mejora, es la reducción de la variabilidad del flujo de trabajo (Liu, Ballard e Ibbs, 2011). Para estabilizar el flujo de trabajo en construcción, se ha introducido el Sistema del Último Planificador (Last Planner System [LPS, por sus siglas en inglés]) (Ballard, 2000), que ha sido aplicado en la construcción para incrementar la productividad laboral. LPS es una herramienta diseñada para mejorar la fiabilidad del flujo de trabajo a través de mejores estrategias de planificación (González, Alarcón y Molenaar, 2009).

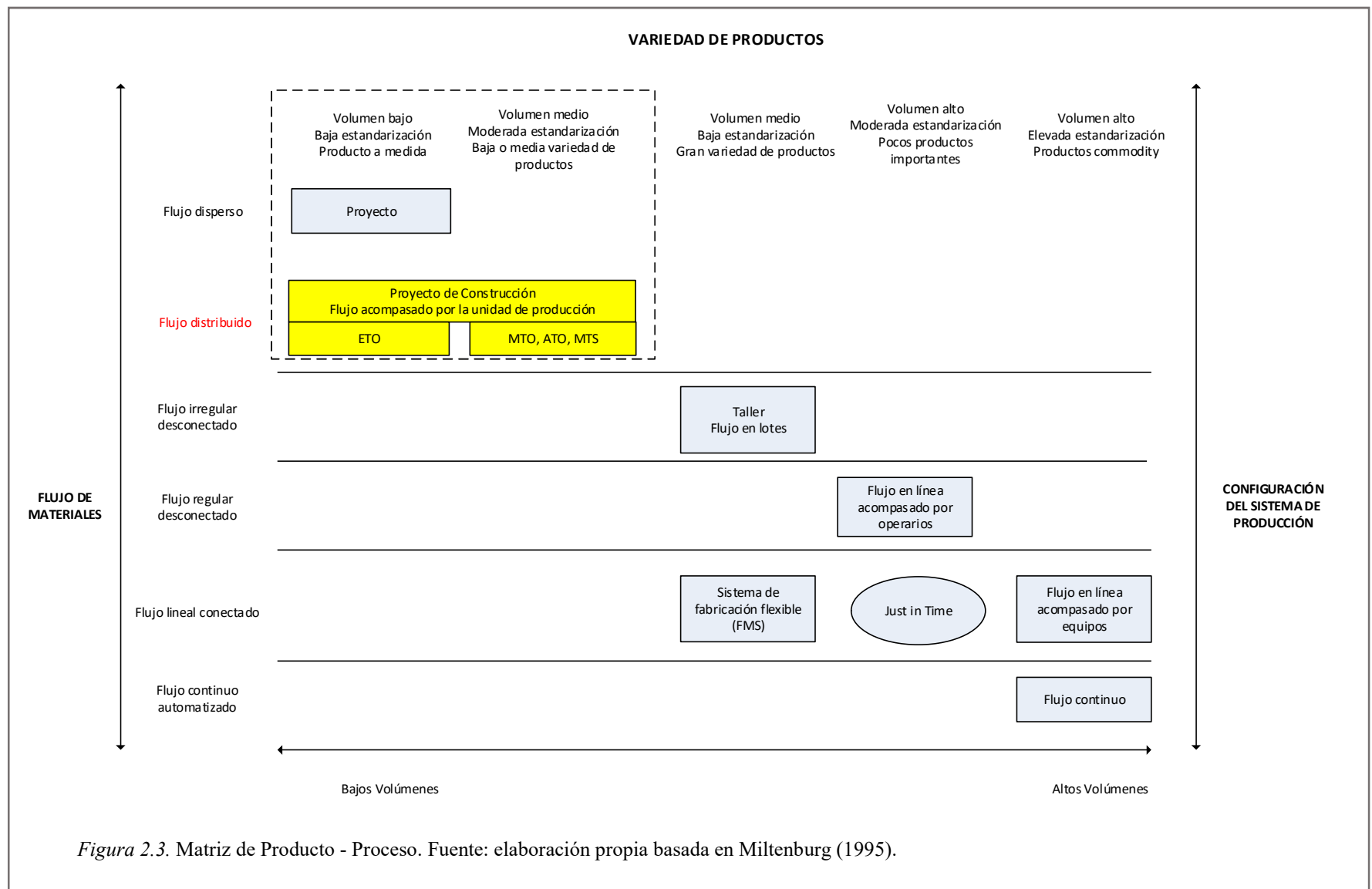
2.1.11 El Sistema de Producción de Proyectos de Construcción: flujo secuencial de actividades acompañado por la unidad de producción

En la clasificación del sistema de producción, según Miltenburg (1995), la construcción se identifica como un sistema de producción por “proyecto”. Un proyecto se caracteriza por ser elaborado a partir de un flujo disperso, baja estandarización, producto único y a la medida. La figura 2.3, la matriz de producto-proceso, presenta de manera gráfica la interacción entre los distintos tipos de sistemas productivos en relación con los volúmenes de producción y el flujo de materiales. Aquí las configuraciones van desde procesos artesanales con flujos dispersos hasta procesos automatizados en flujo continuo. Un proyecto de construcción difícilmente podrá ser realizado con un sistema de producción de flujo continuo, sin embargo, se puede lograr un flujo de actividades de construcción más ágil, donde es la unidad de producción la que controla el ritmo de ejecución. Las fases del proyecto y las actividades en cada una de ellas se llevan de manera secuencial, de tal manera que el producto se va transformando

paulatinamente, y al final de cada fase se obtiene un estado específico del producto para pasar a la siguiente fase. En proyectos de construcción la unidad de producción se refiere al conjunto de personas y de medios materiales organizados con la finalidad de obtener bienes o servicios.

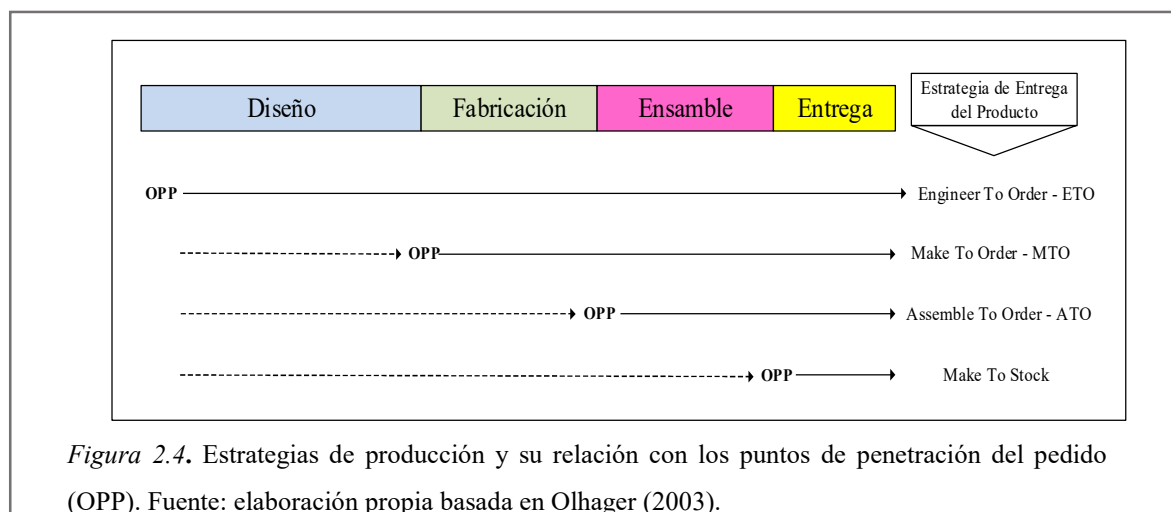
Aunque el proyecto de construcción se puede clasificar en la primera categoría de acuerdo con Miltenburg (1995), las características anteriormente descritas ofrecen elementos para precisar con más detalle su clasificación. La producción de los proyectos de construcción sigue un proceso conformado por las fases necesarias para su elaboración que se repiten de manera similar para otros proyectos. Para el proyecto de construcción no es correcto describir el flujo de materiales como disperso, esto sugiere desorden, y el flujo del proyecto de construcción no es precisamente desordenado, el orden lo establece la secuencia lógica de construcción establecida con ayuda del programa de construcción. Así que puede ser más conveniente referirse a un flujo localizado y distribuido en unidades funcionales. El flujo distribuido mejora la idea de orden según un sistema de planificación y control que garantice la realización de la actividad en el momento justo en que se requiere de acuerdo con el programa de trabajo.

Con base en lo anterior, esta investigación propone denominar el SPPC como un *flujo secuencial de actividades acompasado por la unidad de producción*, haciendo que esta forma de desarrollo de las actividades del proyecto integre conceptos de Just inTime (JIT). El flujo es secuencial debido a que las actividades del proyecto van siendo realizadas una a continuación de la otra, y en cada fase el equipo de trabajo va logrando transformaciones paulatinas del producto, de tal manera que se presenta un volumen bajo o medio de actividades, en la medida en que el proceso de transformación es cada vez más estandarizado. Esto conduce la producción a través de las consideraciones de los entornos de producción teniendo en cuenta el volumen de actividades y el nivel de estandarización.



Un objetivo de la producción es ser ágil para cumplir con los requerimientos de los clientes en calidad, tiempo y cantidad. El uso adecuado de la estrategia de planificación y producción contribuye con este objetivo, además de procurar la minimización de desperdicios relacionados con la proyección misma. Sin embargo, es muy común que los productos no se ajusten eficientemente a las estrategias de producción, o no haya una articulación adecuada entre la producción y ventas sobre el entorno de producción. Entonces, para contar con el producto correcto, calidad y cantidad, toma relevancia el estudio cuidadoso del entorno de producción en el cual se desarrolla la producción del proyecto de construcción.

Estos entornos son: Engineer to Order (ETO) para volumen bajo de producto a fabricar, baja estandarización y producto a medida; Make to Order (MTO); Assemble to Order (ATO) y Make to Stock (MTS) para volumen medio de productos a fabricar, mediana estandarización y poca variedad de productos. En construcción, el punto de la cadena de valor donde el producto está vinculado a un cliente específico se denomina punto de penetración del pedido o punto de desacople (OPP, por sus siglas en inglés). Este punto es muy importante al momento de definir la estrategia de negocio en la cual se mueve la organización (Olhager, 2003), precisamente para permitir la intervención del cliente en el proceso de producción. Los entornos de producción están relacionados con las operaciones de fabricación que permitan obtener productos altamente estandarizados, o una amplia gama de productos. Estos entornos se identifican en la figura 2.4, con la terminología original en inglés. En este sentido, en la medida en que la intervención del cliente sea más tardía, se van obteniendo productos más estandarizados. Por el contrario, si su intervención es más temprana se obtienen productos más especializados hechos a la medida de sus necesidades.



2.1.12 Puntos clave de la sección

El Sistema de Gestión de Producción LC se despliega con base en principios. El valor es el elemento que pone en movimiento el SPPC, ya que, a partir de definir el valor desde el punto de vista del cliente, se configura el sistema de producción para cumplir de manera cada vez más eficiente con la oferta de valor.

2.2 Evaluación del desempeño de Lean Construction

Después de casi un cuarto de siglo de la utilización de Lean en la industria de la construcción (Koskela, 1992), se evidencia el aumento del uso de LC en empresas de construcción en todo el mundo (Aziz y Hafez, 2013). Desde 1993, el International Group for Lean Construction (IGLC) reporta diversas investigaciones que muestran el impacto de LC en el mejoramiento del desempeño del proyecto de construcción. Sin embargo, de acuerdo con Limón (2015), aún no se perciben estos beneficios de manera integral, debido a que todavía no es fácil evaluar si los beneficios obtenidos son consecuencia de la utilización de LC. En la literatura académica se identifican algunas herramientas que evalúan el desempeño de LC en diversos aspectos. Entre ellas se cuenta con modelos de madurez, modelos de evaluación de prácticas Lean, marcos de evaluación del cumplimiento de principios, uso de herramientas y aspectos asociados con las personas relacionadas con LC.

Se identifican seis iniciativas de evaluación de LC, cinco de ellas reportadas en Cano *et al.* (2017) y una más reciente de Sainath, Koshy y Raghavan (2018), para extraer de ellas elementos que contribuyan al desarrollo de una herramienta para la evaluación y evolución de LC en la GPC, la cual permite alinear a las Personas, los Procesos de Producción y el Soporte de la Organización con sus procesos empresariales para la obtención de la entrega del valor ofrecido.

2.2.1 Trabajos relacionados

De acuerdo con Briede y Rebolledo (2010), Garay-Hernández, Espinoza, Martínez-Martínez y Castro-Careaga (2013) y Wendler (2012), un estudio de mapeo sistemático de la bibliografía es un enfoque para realizar un estudio preciso del estado del arte sobre el tema

de interés e identificar con este método trabajos relacionados. El mapeo es una forma de revisión de la literatura que aborda diversas facetas de un mismo tema para identificar y analizar información relevante sobre el tema de interés.

Para la identificación de trabajos relacionados, se adoptaron dos puntos de vista: uno sobre las herramientas de evaluación LC en sí mismas, y otro con respecto a las metodologías para auscultar el estado del arte e identificar las oportunidades de investigación en el tema de interés. No se hallaron referencias de revisiones del estado del arte sobre evaluación de LC. De otra parte, se conocieron dos trabajos relacionados con madurez: uno en el que se revisa la literatura para conocer el estado del arte sobre los Modelos de Madurez (MM), y otro sobre diseño de MM. El valor de estas publicaciones está en el uso de la metodología para conducir una búsqueda bibliográfica de este tipo. Al no disponer de un estudio relacionado con la evaluación de LC, es relevante adelantar el presente estudio de mapeo con este propósito. Un primer trabajo realiza una revisión sistemática de literatura sobre MM (Wendler, 2012).

Se desarrolla el método de mapeo de bibliografía, demostrando que los MM son herramientas reconocidas para identificar el nivel de implementación de estrategias de mejoramiento de la calidad de procesos. Adicionalmente, es explícito que cualquier desarrollo con respecto de una herramienta de evaluación de madurez debe estar complementado con un proceso de validación. El trabajo de Becker *et al.* (2009) presenta una serie de criterios, con enfoque científico, para el desarrollo de MM con énfasis en tecnología de información (TI). Es una guía para realizar diseños metódicos y evaluaciones de madurez en otros dominios, su valor radica en la mirada a los enfoques de madurez y el modelo general para la construcción de MM, a partir de una revisión de referencias con respecto de los requerimientos para su desarrollo. Los principales hallazgos de esta investigación incluyen la clasificación de la bibliografía estudiada en áreas temáticas para seleccionar los elementos que participan de la madurez y evolución de LC, la identificación de modelos o herramientas específicos para la evaluación de LC, otros modelos que pueden ser adaptados para evaluar LC y las tendencias de publicaciones a partir de las primeras iniciativas hasta hoy.

2.2.2 Resultados – Extracción de la información

No se encontró ningún artículo que revisara la literatura acerca de las iniciativas de evaluación de LC. Sin embargo, se identificaron iniciativas de evaluación referenciadas en tesis de maestría y doctorado. A continuación se hace referencia al estudio realizado por Cano *et al.* (2017).

2.2.2.1 Identificación de herramientas para evaluar LC

En el estudio se identificaron 15 referencias relacionadas con la evaluación de LC y en estas referencias se destacan cinco iniciativas de evaluación de LC (tabla 2.9). Cuatro de estas herramientas corresponden a instrumentos para calificar el cumplimiento de prácticas Lean reportadas en cinco referencias: Etges *et al.* (2013), Hofacker *et al.* (2008), Tezel y Nielsen (2013), Valente, Novaes, Mourão, Neto (2012) y Vieira, Souza y Amaral (2012). En Nesensohn (2014) se desarrolla un Modelo de Madurez de LC enfocado a organizaciones donde el proyecto de construcción forma parte de procesos y sistemas como un factor de evaluación.

Tabla 2.9. Iniciativas de evaluación de Lean Construction

Autores	Publicación	Descripción
Hofacker, A.; Fernández de Oliveira, B.; Gehbauer, F.; Darte Freitas, M. do Carmo; Mendes Jr, R.; Santos, A.; Kirsch, J.	Rapid LC Quality Rating Model (2008)	Es una herramienta de evaluación rápida de la aplicación de los principios LC en la etapa de construcción. A través del desempeño de la obra se puede conocer el desempeño de la organización respecto a LC.
Vieira, L.; Oliveira, L.; Amaral, T.	Application of the Rapid Lean Construction-Quality Rating Model to Engineering Companies (2012)	Este modelo es una mejora del modelo original Rapid LC Quality (RLCQ). Utiliza el RLCQ para evaluar la aplicación de los principios de Lean Construction a dos empresas constructoras en el estado de Goiás (Brasil).
Valente, C.; Novaes, C.;	Lean monitoring and evaluation in a construction site: a proposal of Lean (2012)	Establece lineamientos para evaluación en la obra sobre la implementación y consolidación de LC.

Mourão, C.; B. Neto, J.		
Etges, B.; Saurin, T.; Bulhões I.	A protocol for assessing the use of Lean Construction practices (2012)	Se trata de un protocolo para la evaluación del uso de las prácticas de LC en obras.
Tezel, A.; Nielsen, Y.	Lean Construction Conformance among Construction Contractors in Turkey (2013)	Este trabajo presenta y analiza los resultados de los niveles de conformidad LC entre los contratistas. Establece sus fortalezas y debilidades con respecto de LC.
Nesenshon, C.	An innovative framework for assessing Lean Construction maturity (2014)	Desarrolla un marco de evaluación de la madurez que permite a las organizaciones de construcción medir la distancia entre el lugar donde se encuentran y donde ellas quieren estar, en función de su madurez LC.
Yeshwant Sainath, Koshy Varghese, and Raghavan	Framework for progressive evaluation of Lean Construction maturity using multi-dimensional matrix	La gestión de Lean Construction abarca tres etapas: la manifestación física (basada en actividades), la manifestación conductual (basada en la cultura) y la manifestación estratégica (a largo plazo). Identifica factores distintivos de la madurez relacionados con las tres etapas mencionadas. Se desarrolla un modelo de factor ponderado para evaluar la madurez general a nivel de proyecto y organización.
Limon, D.	Medición de la construcción Lean Un modelo de medición del rendimiento que respalda la implementación de prácticas Lean en la industria de la construcción noruega. 2015	Desarrolla un modelo de medición de desempeño del proyecto que soporta la implementación de Lean Construction. Establece relación entre las prácticas utilizadas y los efectos esperados. Propone una herramienta de calificación para facilitar una evaluación comparativa interna de los proyectos.

Fuente: elaboración propia.

2.2.2.2 Identificación de otras herramientas o artefactos que potencialmente sean utilizados en la evaluación de otros aspectos de la implementación de LC

Se presentan ocho referencias acerca de iniciativas de evaluación de principios, ocho sobre uso de herramientas y 12 referencias relacionadas con diferentes aspectos sobre las personas en relación con LC.

- **Las iniciativas de evaluación** se concentran en verificar el cumplimiento de prácticas relacionadas con la aplicación de los principios LC. Estas prácticas se obtienen principalmente de consulta a expertos y el cumplimiento de ellas se verifica con la aplicación de instrumentos como entrevistas, encuestas y observación directa. En esta categoría se destacan principalmente tesis de maestría y algunos autores que presentan resultados de estudios de caso. Las referencias corresponden a los siguientes autores: (Carvalho (2008, 2012), Costa *et al.* (2015), Huang (2013), Shang (2013), Shang y Pheng (2012), Soto (2016) y Vilasini, Neitzert y Rotimi (2011). Se destaca adicionalmente el trabajo de Soto (2016) que presenta un Modelo de Madurez de la aplicación de los principios LC, con el cual pretende evaluar aspectos que se cruzan de acuerdo con los diferentes alcances y niveles organizacionales en el desarrollo de la fase de construcción.
- Otras iniciativas de evaluación se concentran en el desempeño de Last Planner System (LPS) y la manera como se presentan y superan las dificultades para su implementación, la ejecución de mejoras en la productividad, la reducción de la variabilidad y la eficacia de las estrategias de implementación (Alarcón, Diethelm, Rojo y Calderón, 2008; Cortez, Cortez, García y Rodríguez, 2009; Jünge, Kjersem, Shlopak, Alfnes y Halse, 2015; Kim y Park, 2006; Ogunbiyi, Oladapo y Goulding, 2011; Ogunbiyi *et al.*, 2014; Pavez, González y Alarcón, 2010; Salem, Solomon, Genaidy y Minkarah, 2006). Una de estas evaluaciones amplía su alcance a herramientas como gestión visual, reuniones diarias, estudios de inicio, 5S y prueba de fallas de calidad (Salem y Zimmer, 2005).
- Los procesos de **validación de las herramientas** son escasos, aunque algunas herramientas se aplican en campo. Los resultados de la aplicación de herramientas se presentan en las referencias como casos de estudio. En general, los autores reconocen

que se requiere de más aplicaciones para consolidar resultados que conduzcan a tomar decisiones más precisas sobre los procesos de evaluación.

- Otra de las iniciativas de evaluación permite **identificar las capacidades de las personas** para la gestión y el desarrollo de los procesos LC en una organización de construcción. Al reconocer estas capacidades en las personas, la organización puede promover, desarrollar, motivar, organizar y retener el talento necesario para mejorar continuamente y sostener los procesos relacionados con LC (Castka, Bamber y Sharp, 2004; Cruz y Santos, 2015; Curtis *et al.*, 2009; Pavez y Alarcón, 2006; 2007; 2012; Sarhan y Fox, 2012; 2013b; Tortorella y Fogliatto, 2013; 2014; Salvatierra, Alarcón, López y Velásquez, 2015).

2.2.2.3 Relación de las metodologías de investigación utilizadas en el desarrollo de iniciativas de evaluación de LC

En todos los casos, la metodología de investigación que se desarrolla es cualitativa. Se hace uso principalmente del conocimiento de expertos. Se destacan las entrevistas para recolección de información tanto para la construcción del instrumento como para su aplicación. También se utilizan las encuestas como instrumentos complementarios para recolección de información. La actividad más relevante es el grupo focal, del cual se obtiene información más precisa, pues involucra el criterio experto sobre las preguntas, por lo general abiertas, con que se aborda esta actividad. Los expertos son consultados tanto para obtener información relevante para el desarrollo del modelo como para la validación (Nesensohn, 2014).

2.2.2.4 Identificar en la literatura la existencia de iniciativas estándar para dirigir la evolución de la madurez de LC a través de niveles de madurez

En el marco de esta revisión, no se halló información referente a herramientas que contribuyan a la evolución de la madurez de la implementación de LC en general, ni con referencia a la GPC, ni en las otras temáticas clasificadas.

2.2.3 Implicaciones de la investigación

No se identificaron modelos de evaluación de la madurez de LC con enfoque específico en la GPC. No se evidencian iniciativas de evaluación que consideren las fases de ejecución del proyecto de manera conjunta. Esto confirma la existencia de una brecha en el conocimiento relacionada con la formulación de una herramienta de evaluación de LC en la GPC.

Los artículos abordan marcos conceptuales que apoyan el desarrollo de las iniciativas de evaluación en forma resumida. Las tesis desarrollan en mayor profundidad conceptos y teorías relacionadas con el tema y no se identifican aportes teóricos relevantes al tema de evaluación de LC. Se identifican diversos modelos de madurez que podrían ser adaptados para su aplicación a LC, modelos desarrollados para construcción, así como también modelos de otros dominios tales como el CMMI, LCMM, SPICE, PRINCE, EFQM, entre otros que son estudiados en el desarrollo de esta investigación. No hay una manera estándar para establecer los lineamientos comunes que deben ser incluidos en el desarrollo de un modelo de madurez de LC.

También conviene decidir si se adaptan modelos de madurez existentes o se desarrollan nuevos modelos según el interés de evaluación. De igual manera, es conveniente decidir qué proceso de validación es más conveniente para una herramienta de evaluación de LC.

Ya en la práctica, la aplicación de una herramienta de evaluación debe conducir las acciones que permitan avanzar de un nivel de madurez a otro con un impacto destacado en el desempeño del proceso de producción resultado de esta madurez. Evaluaciones y acciones que deben ser entendidas y gestionadas por las personas en el sistema de producción y no debería ser una tarea de consultores por medio de auditorías. LC en sí misma invita a la participación de los equipos de trabajo en esta tarea, las auditorías solo deberían ser consideradas como una acción de verificación y no la acción principal de evaluación.

La aplicación del modelo de evolución podría ser vista como una herramienta de *benchmarking*, la cual permite el compartir la información como una estrategia colaborativa dentro de la misma organización, así como del sector hacia el establecimiento de más altos estándares de desempeño.

2.2.4 Limitaciones del estudio de evaluación del desempeño de Lean Construction

Solo se hace uso de investigaciones publicadas en revistas académicas, congresos relevantes en LC y tesis de maestría y doctorado seleccionadas. No se incluyen publicaciones como informes técnicos.

2.2.5 Puntos clave de la sección

Se dispone de siete iniciativas de evaluación de LC. Estas evalúan principalmente la aplicación de LC en la etapa de construcción con relación al uso del artefacto de evaluación en el sitio de construcción (Etges *et al.*, 2013; Hofacker *et al.*, 2008; Tezel y Nielsen, 2013; Valente *et al.*, 2012; Vieira *et al.*, 2012) y solamente Nesensohn (2014) avanza en su evaluación al integrar otros conceptos, tales como las personas, el liderazgo, el aprendizaje, los resultados y la implementación misma.

Capítulo 3

LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Resumen

Las organizaciones de construcción desarrollan su actividad comercial a través de proyectos de construcción y es la GPC el proceso más relevante en ellas. En las dos últimas décadas, algunas compañías constructoras alrededor del mundo han venido integrando a LC en la GPC en virtud de los beneficios que ofrece en la búsqueda de una mayor eficiencia. De igual manera, cada vez hay más interés, por parte de estas organizaciones, en conocer el alcance de la madurez de LC con el fin de proponer, a partir de esta evaluación, acciones para lograr mejoras del sistema de producción para ser más eficientes. En esta vía, es importante comenzar por entender aspectos relacionados con la implementación y la madurez de LC en la GPC para conducir el uso del SLC-EModel como herramienta de evaluación y evolución hacia niveles superiores de madurez. Estos conceptos se despliegan en este capítulo para dar cumplimiento al primer objetivo de la tesis. Más adelante, en los capítulos 4 y 5, se presenta el modelo de evolución con lo cual se alcanzan el segundo y tercer objetivos.

Este capítulo se ha desarrollado al sistematizar el conocimiento obtenido de los expertos consultados en el desarrollo de esta investigación. Las consultas han sido desarrolladas en cuatro momentos; tres entrevistas y una encuesta. La información relacionada con estas consultas se encuentra en el Anexo 1.1, el cual presenta la caracterización de los participantes en cada consulta. Con estas consultas, se recolectó información con la que fue posible construir los conceptos relacionados con la madurez de LC con enfoque en la GPC y que contribuyen a identificar los elementos relacionados con la madurez de LC, como se verá más adelante.

3.1 Implementación de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

La industria de la construcción, una de las más importantes para el desarrollo de un país, merece atención para ser cada vez más eficiente. Es una industria muy fragmentada, poco estructurada, con prácticas constructivas artesanales, además, la formación de sus profesionales está más orientada a las técnicas de construcción y menos al desarrollo de un modelo de gestión. Esta industria se percibe atrasada con relación a otras como la manufactura, por ejemplo, la industria automovilística, la cual está a la vanguardia en el uso de la tecnología para el desarrollo de sistemas de gestión y particularmente en la implementación de prácticas Lean, como en la gestión de su cadena de suministro. Muchas industrias han migrado de la producción artesanal a la producción en masa y más tarde a la producción Lean; han entendido que Lean es una alternativa de mejora del desempeño de la producción. Actualmente, se está presentando migración hacia la llamada industria 4.0², la industria digital, la globalización; una migración hacia las nuevas tecnologías que se mezclan con Lean para trabajar de manera complementaria.

La industria de la construcción también cuenta con experiencias en industrialización, sin embargo, no es una industria que pase por la producción en masa, pues la construcción desarrolla procesos *ad hoc* para el desarrollo del proyecto, especialmente en el sitio de obra. Así que, buscar la transformación de la construcción en un proceso más industrializado implica un cambio en la mentalidad en esta industria, comenzando por entender que el proyecto de construcción es para la construcción, lo que para la manufactura es el piso de fabricación. El piso de fabricación es el lugar donde “suceden las cosas”, donde se elabora el producto y donde las personas y las máquinas interactúan. En manufactura, el producto pasa por diferentes estaciones de trabajo hasta que es terminado; en construcción, el producto se va elaborando en cada una de las fases del proyecto (en la fase de construcción las unidades de producción pasan a través del producto).

La baja productividad en la industria de la construcción en comparación con otras industrias, la falta de transparencia, la deficiencia en coordinación y comunicación entre los actores

² De acuerdo con Crespo (2017) La Industria 4.0 se refiere a la digitalización de las cadenas de valor. Eso se logra al integrar datos, software inteligente y sensores en toda la cadena de suministro lo que permite planificar y controlar la producción de manera inteligente.

involucrados, la dificultad de entregar la calidad requerida, los errores de elaboración de las diferentes fases del proyecto, la falta de una correcta distribución de información, la inseguridad en el sitio de trabajo, la corrupción, entre otros, son algunos de los problemas que pueden ser resueltos o asistidos de manera más favorable y exitosa a través de la implementación de LC (Bashir, Suresh, Proverbs y Gameson, 2010). El producto de la implementación de Lean se muestra en procesos de producción más eficientes y eficaces (Alarcón *et al.*, 2005), con lo cual las organizaciones de construcción pueden establecer una oferta de valor que se diferencia de la competencia (Almeida y Salazar, 2003). De las entrevistas con expertos se presenta la sistematización de ese conocimiento, el cual se agrupa en cuatro temáticas que se presentan a continuación.

3.1.1 Componentes del sistema de producción de proyectos de construcción

La producción de proyectos de construcción se asimila al piso de fabricación en manufactura. Este es el sitio donde ocurre la acción, sin embargo, dicha acción requiere de la participación de personas capacitadas, con actitud y disposición hacia el trabajo y la organización, poniendo a disposición del proyecto sus procesos organizativos en los niveles directivos, tácticos y operativos.

La implementación de LC va desarrollándose sistemáticamente en la medida en que se avanzan en mejoras del sistema de producción, y este va logrando un mejor desempeño, va madurando. Es una simbiosis: el sistema mejora con la implementación de LC y la implementación de LC va teniendo un mayor alcance. Esta implementación presenta situaciones que se oponen a su buen desempeño, de tal manera que estudiar las barreras y los factores críticos de éxito (FCE) permite construir el entendimiento de su impacto en la implementación de LC.

En estudios previos (Cano, Delgado, Botero y Rubiano, 2015a; 2015b; Mano *et al.*, 2018) se examinan artículos académicos –publicados entre 1998 y 2018– con base en experiencias de la implementación de LC alrededor del mundo, para identificar barreras y FCE, los cuales se clasificaron en tres componentes que sirvieron de base para la definición de las categorías del SLC-EModel. Estos componentes se definen luego de entender el sistema de producción como una serie de elementos organizados que interactúan entre ellos y lo conectan con los

clientes y el ambiente externo. Este sistema incluye personas, máquinas, procesos, subprocesos, procedimientos, flujo de información, materiales y la gestión misma. Todos estos elementos hacen que los insumos sean transformados en un producto o servicio (Carro y González, 2012). Estos componentes son:

- ***Las Personas*** que forman parte de la organización y que soportan los procesos de producción del proyecto y al sistema de producción mismo. Corresponde a la participación de las personas en todas las actividades de producción tanto en la organización como en el sitio de producción. La participación de las personas es un aspecto determinante para el desarrollo de las actividades productivas. Es con base en las personas que se sustenta el sistema de producción y en la medida en que las personas se involucran, se alcanzan los objetivos operacionales y, por consiguiente, los objetivos empresariales.
- ***El Sistema de Producción*** por medio del cual se elabora el producto. Las funciones de producción se llevan a cabo en el sitio mismo de la transformación de los insumos en producto. “Cada acción de transformación que da lugar a cambios en los insumos se denomina una operación y la secuencia de operaciones requerida para completar un ciclo determinado de transformaciones es llamada proceso. Por ello se habla de proceso de transformación” (Carro y González, 2012, p. 3).
- ***El Soporte de la Organización*** con cuyos procesos empresariales se apoyan los procesos de producción del proyecto de construcción. Son aquellos procesos y funciones empresariales, tanto internos como externos, que no son operaciones de producción propiamente dichas, sin las cuales la producción no se puede llevar a cabo.

3.1.2 Implementar Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

De acuerdo con los expertos entrevistados, lo primero y más importante al pensar en la implementación de LC es contar con la claridad de los beneficios y los resultados que se pretenden alcanzar con esta. Las empresas implementan LC por distintas razones. Por ejemplo, hay empresas que empezaron a implementar conceptos Lean para lograr una mejor relación con el cliente, convertirse en una empresa “industrial avanzada”, ser más

competitivas en términos de gestión y prevención de riesgos laborales, reducir y acabar con reclamos de los clientes. Otras empresas implementan LC porque otras lo están haciendo, y su objetivo es ser mejor que su competencia.

Los expertos se refieren a diferentes maneras de avanzar en un proceso de implementación y reconocen que son diversas las estrategias para este fin, lo que evidencia que no hay consenso respecto de una ruta de implementación de LC. Algunos sugieren iniciar por la organización y luego pasar al proyecto, en tanto otros recomiendan comenzar por el proyecto. Por otro lado, para algunos implementadores es importante iniciar por el diseño, para otros por la producción, el cliente o por los proveedores. En ciertas empresas se empieza de una forma más interna, en otras de una forma más externa con la relación con el cliente, en otras por la innovación en el producto o el servicio. Los expertos refieren que es común que las implementaciones de LC se inician en una línea de producción, una planta, una obra, un equipo de diseño, un proceso o proyecto piloto, y después se amplía a otros procesos de la organización. El proceso de transformación es largo, no se convence a las personas por mucho tiempo con palabras, las personas deben ver los beneficios rápido, beneficios para cada uno, y en este sentido se establecen compromisos, cambio de actitud y mucha más motivación. Ese beneficio debe ser percibido por cada persona en el proceso. Entonces, surge un cuestionamiento al respecto: ¿Hay un camino a seguir, para realizar la implementación de LC, que las empresas no dimensionan?

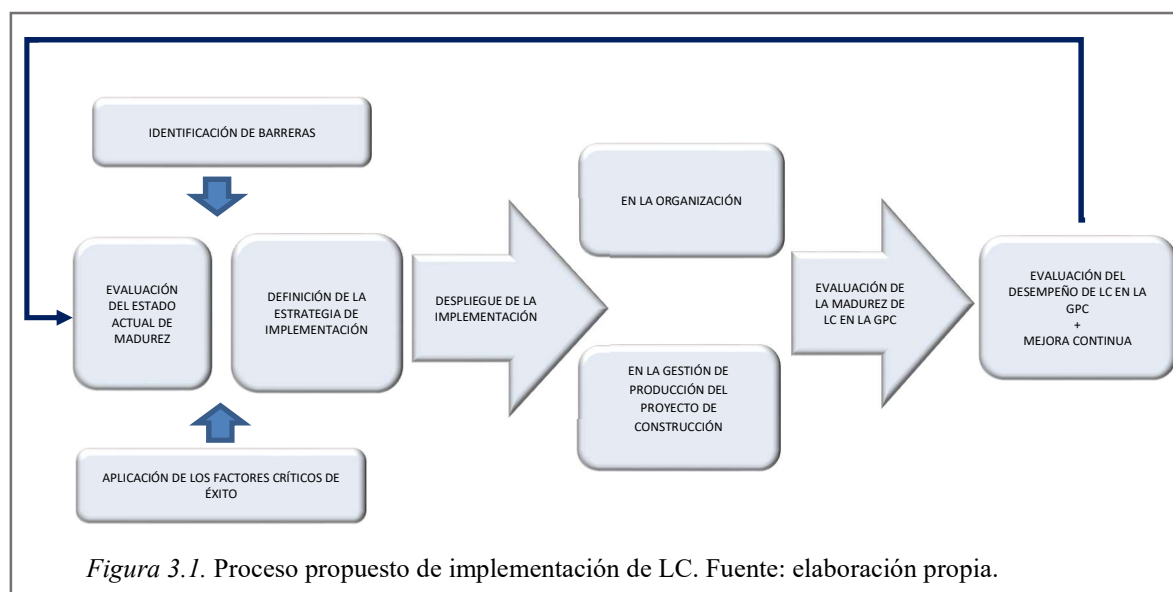
El beneficio principal de la implementación de LC es la mejora del desempeño del negocio, sin embargo, las organizaciones de construcción presentan sistemáticamente dificultades para realizar la implementación de LC. Estas dificultades se han venido sistematizando en la identificación de las barreras que se oponen a su implementación (Cano y Rivera, 2015; Mano *et al.*, 2018), así como los factores críticos de éxito (FCE) que contribuyen a garantizar el éxito de dicha implementación y que pueden ser usados para contrarrestar el efecto de las barreras. Es importante realizar esta identificación, caracterización y categorización, para trazar una estrategia que, en conjunto con la ruta de implementación, un plan de mitigación y eliminación de barreras, aporten al éxito de la implementación.

En el corto plazo, los beneficios de la implementación de LC corresponden con la reducción de desperdicios, la mejora de la productividad, la rentabilidad, el mejoramiento del flujo de

trabajo y el aumento de valor, la satisfacción de los interesados, se evidencian periodos de construcción más cortos, reducción de mano de obra, aumento de la flexibilidad del sistema, mayor calidad y mejor seguridad y salud (Jørgensen, 2006; Mossman, 2009; Thomas, Horman, Minchin y Chen, 2003).

En el largo plazo, los beneficios tienen que ver con la retención de personal, la construcción de un mejor ambiente de trabajo, la disposición de proyectos más seguros para las personas, el logro de un mayor control del proyecto, mayor flexibilidad, el desarrollo de una cultura en torno al mejoramiento continuo, una cultura que habla el mismo idioma, entre otros aspectos. De esta manera, responder mejor a próximos proyectos, a nuevas solicitudes y adaptarse a cambios y solicitudes cambiantes de los clientes.

Como se evidencia en esta investigación, la implementación de LC en la GPC debería seguir sistemáticamente una “ruta” que incluya los elementos que la hacen más eficiente. Se propone que esta ruta vaya siendo definida con ayuda del SCL-EModel, y de acuerdo con las condiciones de la organización, según el esquema general mostrado en la figura 3.1. Es importante aclarar que la ruta de implementación no es única, pues todas las organizaciones no se encuentran en las mismas condiciones ni desarrollan la GPC de la misma forma, y hasta podría identificarse una ruta crítica de implementación.



Para conducir una adecuada estrategia de implementación y evaluación para la mejora continua, se deben identificar los atributos relacionados con la madurez de LC, mismos que son objeto de implementación de LC. Esta identificación implica establecer cómo se

encuentran relacionados los atributos, la forma en que se asocian para conformar factores de madurez, su importancia en el alcance de la madurez de LC en la GPC y cómo ellos avanzan en su madurez individual. La intervención de LC en estos atributos permitirá disponer de un sistema de producción LC desarrollado de acuerdo con las condiciones particulares de la organización que implementa LC, en la búsqueda de mejorar la eficiencia de la producción de proyectos de construcción.

En los últimos años se ha venido demostrando que con la implementación de LC se pueden mejorar los resultados del proyecto de construcción y, por consiguiente, de la organización (Aziz y Hafez, 2013). Los proyectos de construcción son complejos y no se garantiza el logro de los objetivos con la motivación individual de las personas, se requiere la aplicación de principios y herramientas que ayuden a trabajar colectivamente, a disciplinar el trabajo, entender y resolver los problemas de manera sistémica y entender el desempeño del proyecto en su interacción con el medio, entre otros aspectos. LC y sus herramientas contribuyen a gestionar esta complejidad y ayudan a producir mejoras sistémicas en la productividad de las personas de manera individual y como equipo. Con una adecuada implementación de LC en la GPC se espera una mayor consistencia en el desempeño del sistema de producción. La consecuencia de la consistencia es mejor calidad, que la gente sepa lo que tiene que hacer y lo haga bien, que la gente trabaje con gusto, que el entorno de trabajo sea seguro y productivo, que se cree la disciplina que permita mantener las costumbres y las acciones de mejoramiento continuo.

3.1.3 Diferencias en la implementación de Lean en la organización y en el proyecto de construcción

Una organización de construcción está al nivel de corporación y el proyecto materializa su producto. Se presentan importantes diferencias entre implementar LC en la organización de construcción y en el proyecto. Las formas de gestión en cada instancia son diferentes, la organización cuenta con una alta capacidad para gestionar los procesos de soporte al proyecto de construcción. En la organización es más aplicable el pensamiento Lean o administración estilo Lean, la diferencia está en el producto, el cual hace particular la gestión de producción del proyecto. De acuerdo con los expertos consultados, LC tiene cada vez más sentido en el

ámbito de los proyectos de construcción, cuenta con principios y tecnologías eficientemente adaptadas para la construcción.

Al comenzar la implementación de LC, la organización debe tener claridad sobre los objetivos que se persiguen para el proyecto. Es importante, entonces, la alineación y sincronización de la organización con el proyecto. La implementación se enfoca en capacitar, en lograr una cultura a largo plazo, no se piensa en herramientas específicas, estas pueden cambiar, podría ser LPS u otra después; lo que no va a cambiar es el sustento basado en los principios, los conceptos asociados a la eliminación de pérdidas, el mejoramiento del flujo y la creación de valor.

En la organización, se parte de implementar herramientas, como el Value Stream Mapping (VSM, por sus siglas en inglés), entender principios como un todo e implementar mejoramiento continuo para involucrar distintas áreas de manera más rápida. Cuando se implementa Lean a nivel organizacional se desarrolla una estructura que soporta la implementación en el proyecto. Esto va asociado a comportamientos esperados; la organización proporciona los estándares, las comunicaciones son formales y se empodera a las personas que van a liderar estas iniciativas. Si no se cuenta con una organización que integre las fases del proyecto, considerando que lo que sucede en el proyecto es en cierta forma un “clon” de la mentalidad de la organización, se verá comprometido el desempeño de la implementación en el proyecto.

Una premisa para la implementación de LC, es que se cuente con un concepto integrado de las fases del proyecto. La implementación de LC en el proyecto busca obtener beneficios rápidamente. Esto se logra implementando herramientas como LPS o 5S, con las cuales, si las personas aún no tienen convencimiento de los beneficios de LC para el proyecto y la organización, se pueden desarrollar de manera independiente del proceso de implementación. A las personas primero se les entrena en una disciplina y con los resultados se genera convencimiento, de ahí en adelante se desarrolla el conocimiento para trabajar con las herramientas. La alta rotación del personal es un elemento que tiene un impacto negativo en el proceso de implementación de LC, especialmente en el proyecto más que en la organización; sin embargo, es un elemento al que la organización debe prestar mucha atención, debe estar conectado con la estrategia que apoya permanentemente la

implementación de Lean en la organización, y buscar que la aplicación sea sustentable en el tiempo a pesar de que las personas roten. En este sentido, si el quehacer de la organización son los proyectos de construcción, es la gestión del proyecto la que madura.

La implementación de Lean cuenta con dos caminos que deberían usarse en la medida en que se genere convencimiento y conocimiento al interior de la empresa, para más adelante entender y trabajar mejor en los proyectos con sus herramientas. En la empresa no se atiende el resultado específico como en los proyectos, se enfoca en la estrategia, el comportamiento de indicadores, se evalúa el objetivo y el mensaje que se está enviando al proyecto. En cuanto al proyecto, lo importante es cumplir la oferta de valor.

3.1.4 ¿Cómo debe ser una implementación efectiva de Lean en la gestión de producción de proyectos de construcción?

El objetivo de LC es mejorar el flujo de producción de los proyectos, eliminando sistemáticamente las actividades que no agregan valor y maximizar el valor de entrega al cliente (Pons, 2014); asimismo, propone cambiar el sistema tradicional a un sistema innovador diferente (Ayarkwa, Agyekum, Adinyira y Osei-Asibey, 2011). La decisión de realizar un proceso de implementación de LC debe convocar la participación de todas las personas en el sistema y es la Gerencia la impulsora del cambio. Desafortunadamente, no es suficiente que se realicen actividades voluntarias, las personas necesitan tiempo para pensar y actuar en todos los aspectos de la implementación y también para aprender de los errores. En este proceso, la medición es importante para establecer parámetros de comparación de las mejoras. LC es un proceso de mejoramiento continuo, cuyo objetivo es construir una cultura de mejora continua para garantizar su sostenibilidad (Salvatierra *et al.*, 2015).

Lean en construcción crea una nueva forma de gestión de producción de proyectos. Esto se logra a través de la materialización de los principios. Esta forma de gestión se diferencia de la gestión tradicional en que permite definir claramente tanto los objetivos como la estructura de fases en que se desarrolla el proyecto, lo cual mejora la relación entre ellas y la participación de las personas (Ballard y Howell, 2003). La implementación de LC no debe estar restringida al uso de herramientas (Koskela y Ballard, 2012), se trata de cambiar la forma de gestionar el proyecto, y con esto cambiar la estructura de la empresa. Esta tarea

requiere de personas con habilidades para resolver problemas de manera ingeniosa y que conformen equipos de trabajo comprometidos. Aunque por lo general la implementación de LC inicia con herramientas, rápidamente se entiende que es indispensable un cambio de pensamiento y gestión (Aziz y Hafez, 2013).

De otra parte, la gestión de cambio es la responsable de mantener equipos motivados, formados y comprometidos. Se debe contar con líderes convencidos de los beneficios de vivir la filosofía, con un profundo conocimiento de sus principios, la importancia de las personas y un eficiente uso de las herramientas. En sus comienzos se han implementado herramientas LC con más énfasis en obra, sin embargo, la experiencia va demostrando la importancia de ampliar esta implementación a todo el ciclo del proyecto. Así se exige de la organización el servicio de cada uno de los procesos que apoyan la gestión. Con la implementación de LC en el proyecto, y especialmente en la obra, se revelan los problemas no resueltos en la organización y las áreas de soporte del proyecto. Se trata de un ciclo de realimentación que conduce al aprendizaje organizacional y al mejoramiento continuo del desempeño del proyecto.

Entre las dificultades que aparecen en las organizaciones de construcción para abordar procesos de implementación de LC está la poca comunicación entre las áreas. Estas áreas presentan bajo nivel de relacionamiento entre ellas, lo que compromete el desempeño del proyecto al no sincronizar efectivamente sus procesos. Así, todas las áreas de la organización deben mapear sus procesos e identificar detalladamente su flujo de valor, sus proveedores y clientes, además de la manera como se sincronizan eficiente y efectivamente con el proyecto, “no sería coherente contar con implementaciones parciales, un área de la empresa con cierto orden y el resto viviendo en un caos” (Gaete, 2016).

Los proyectos se realizan con el apoyo de áreas de la organización como tecnología de información y recursos humanos, entre otras, y su aporte al desempeño del proyecto hace necesario que los procesos en dichas áreas de la organización adquieran una gestión Lean. Una mejor gestión se refleja en la alineación de la organización con el proyecto y viceversa, lo cual se evidencia en que los indicadores de desempeño muestran que se está cambiando, no basta con que la obra esté muy limpia, muy organizada, que se lleve a cabo la reunión de

planificación semanal y que el personal esté uniformado, sino se cumple con los plazos, ni con el presupuesto y se entrega un producto de dudosa calidad (Gaete, 2016).

Hay que ir más allá, es conveniente preguntarse si la implementación ha servido para algo, o si el clima que se está creando con las personas está representando resultados en el desempeño del proyecto. Si las respuestas son negativas, el ejercicio no funciona y la implementación de LC no tiene impacto.

A continuación, se presenta una serie de recomendaciones para realizar un proceso de implementación, las cuales han sido obtenidas de los expertos consultados en esta investigación. Luego de estas recomendaciones, se presentan unas más precisas para las categorías definidas en el estudio.

- **Recomendaciones generales**

- Mantener al equipo motivado y centrado en el cliente.
- Organizar el proyecto en torno a cadenas de valor y mapearlas continuamente.
- Fomentar continuamente el liderazgo y mantener motivado al equipo del proyecto.
- Fomentar en el equipo de trabajo el respeto y la confianza en las personas.
- Mantener planes de entrenamiento continuo del equipo del proyecto en los diferentes niveles jerárquicos y fases del proyecto.
- Utilizar progresivamente herramientas y rápidamente desarrollar un cambio de pensamiento y gestión.
- Propiciar la solución de problemas con uso constante de Kaizen.
- Desarrollar procesos de aprendizaje a largo plazo.
- Desarrollar líderes y un sistema de sucesión.
- Alinear las metas desde la perspectiva de la cadena de valor.
- Utilizar sistema de medición de indicadores de proceso y con base en él tomar decisiones.
- Visibilidad de resultados y desarrollar canales de comunicación y retroalimentación para todos en el proyecto.

- La implementación de LC debe ser una obligación para todos los miembros del proyecto con el compromiso de la Alta Dirección.
- Referenciación permanente, tanto interna como externa.
- Promover el mejoramiento continuo.

- **Sobre las Personas**

- La cultura se manifiesta en la experiencia de la compañía en el hacer. El hacer provoca en las personas cambios en su forma de ejecutar las cosas, de esta manera se construye una línea base para que las personas se inicien en la filosofía a partir de la cual avanzar. Sin embargo, no es conveniente llenarlas de conceptos. El teorizar y después aplicar no es una buena estrategia, no se sostiene en el tiempo, pues las personas vuelven a hacer lo que han hecho por mucho tiempo.
- El aprendizaje debe realizarse entre la práctica y la teoría, pero desarrollar la teoría desde la práctica. Esta ha sido la forma más eficiente en que se ha introducido LC y se va desarrollando la cultura.
- La implementación parte de eliminar los desperdicios en los procesos y es aquí donde se ven los resultados más impactantes. Después de esto hay que sostener el cambio, lo que marca el éxito de la implementación que se refleja en resultados.
- Desarrollar una cultura de mejora continua, entender el problema e identificar soluciones en conjunto, avanzar en capacitaciones, realizar talleres y seguir haciendo el ejercicio por largo tiempo.
- En el corto plazo hay que enseñar en el hacer; en el mediano plazo se debe sostener generando una concepción de aprendizaje que siempre debe mejorar.
- Se debe promover que las personas realicen procesos de innovación. Para innovar se debe contar con capacidades que permitan identificar cómo mejorar las condiciones de trabajo, las condiciones asociadas con los interesados del proyecto desde el punto de vista de la red de trabajo. Esto implica involucrar tecnología para ser más eficientes.

- Permitir a las personas adquirir habilidades para el desempeño de la implementación creando equipos de personas que apoyen dicha implementación en todos los niveles de la organización. Esto permite desarrollar de manera sostenida el concepto de mejora continua, a pesar de las dinámicas de las organizaciones en las cuales las personas que recién llegan a los procesos no cuentan con la cultura LC. Se incentiva a que en la organización haya personas que vayan escalando en la filosofía, que la organización desarrolle procesos continuos de formación certificando a las personas en Lean. Esto genera aprendizaje sin romper la cadena de trabajo, lo que implica un proceso de cambio organizacional.
- Avanzar en los niveles de formación, de esta manera cada persona genera un proceso de interacción más amplio en términos de la mejora continua entre más participantes del proyecto, para así desarrollar habilidades para incorporar más elementos de manera sistemática para el mejor desempeño de la implementación y del proceso.
- Enfatizar en el desarrollo de conocimientos y capacidades de las personas, más que en el proceso mismo. El desarrollo de las capacidades de las personas se realiza a partir del proceso en el cual estén involucradas. El proceso es importante por el aprendizaje que logren las personas, y desde este punto, se gestiona la mejora del proceso.

- **Sobre el Sistema de Producción**

- Antes de realizar una evaluación de prácticas, se debe contar con un plan de implementación y definir los parámetros del cambio esperado con las prácticas.
- Definir cómo es el proceso de implementación y qué tan importante es el cambio que se producirá con la implementación de esas prácticas para el proyecto.
- Contar con una frecuencia de evaluación por parte del responsable del proyecto, pues así tiene el criterio para asignar la calificación. Evaluar y usar la evaluación para mejorar es muy importante.
- Conectar los principios y las prácticas. Definir claramente cómo un principio y una práctica se complementan, y precisar la interdependencia entre ellos.

- Identificar los factores claves del desempeño de LC y las relaciones entre ellos. Debe haber un número mínimo de factores para conseguir prácticas Lean más sistémicas.
- Asegurar los flujos en el proceso, esto se da en función de la gestión de las personas, de la gestión del cambio. Asegurar el flujo implica todo, personas, procesos y herramientas. Contar con procesos controlados, desarrollar en las personas actitudes y comportamientos que impactan los procesos de producción y de gestión, la estandarización, la mejora continua, los mejores sistemas de producción desarrollados a partir de las consideraciones de valor, la eliminación de pérdidas y el mejoramiento del sistema para garantizar flujos continuos y crear una cultura de hacer las cosas de forma ordenada.
- Establecer un sistema de indicadores de proceso que permitan el control y buscar continuamente la mejora de estos indicadores.
- Realizar la implementación del sistema de producción, verificar que se inicie el uso en el sistema, entender qué usar, cuándo usarlo, configurar las herramientas y establecer rutinas. Esto se lleva a cabo con un equipo interno de líderes que apoya y ayuda a corregir y alinear la implementación, así como a verificar el nivel del uso de LC.

- **Sobre el Soporte Organizacional**

- La Alta Dirección debe destinar tiempo en su agenda de trabajo diario para llevar a cabo acciones de liderazgo visibles, en las que se ejecutan las iniciativas de mejoramiento continuo. Estas acciones deben alcanzar resultados que están establecidos como objetivos y realizar seguimiento a los indicadores que de manera indirecta miden el desempeño general.
- La Alta Dirección debe estar convencida de los beneficios que puede obtener de la implementación y entender que estos beneficios se logran en el largo plazo, a pesar de que algunos se alcancen en el corto plazo. Debe contar con un alto conocimiento y entendimiento de LC, no solo convencerse y apoyar la implementación, sino también profundizar en el conocimiento para hacer frente a los retos que se

presentan, porque la construcción todavía no es un *commodity*³, a pesar de que los clientes crean que lo es. En la construcción, un proyecto mal gestionado puede quebrar una empresa, es un negocio de alto nivel de riesgo, a diferencia de otras industrias.

- Ante situaciones difíciles, que lleguen a comprometer la estabilidad de la implementación, es preciso entender que cada proyecto es único y el riesgo es intrínseco al mismo. No dudar si el camino es el correcto por no haber alcanzado aún un alto nivel de conocimiento. Se necesita disciplina y esta es el resultado de la claridad y la motivación.

3.1.5 Mejoramiento del Sistema de Producción de Proyectos de Construcción con la implementación de LC

- El proceso de obtención, transmisión e intercambio de información debe ser claro y eficiente. La información ayuda a entender las causas de las desviaciones respecto del plan lo antes posible y ayuda a planificar el avance del proyecto de acuerdo con lo que se debe y puede hacer.
- El sistema de producción y la producción del proyecto mejoran en la medida en que la información obtenida contribuye a tomar mejores decisiones.
- Enfatizar en la gestión al nivel táctico, de manera que se remuevan eficientemente las restricciones, esto significa lograr la coordinación multidisciplinaria necesaria para el proyecto.
- Es inconsistente decir que la implementación de LC está madurando y observar que el proceso de producción no mejora. De ahí que los expertos que han formado parte de esta investigación coinciden en que es muy importante que LC alcance altos niveles de madurez en su proceso de implementación en la GPC.
- Uno de los aspectos que muestran la madurez de la implementación de LC corresponde con los resultados observables de mejoramiento. Es conveniente definir cuáles son los

³ Los *commodities* son bienes genéricos, es decir, no se percibe una diferenciación entre ellos.

resultados que se espera obtener con la implementación de LC. Un ejemplo en manufactura es, según Rivera (2016):

Florida Power & Light, una empresa estadounidense que genera y distribuye energía en la Florida ganó el premio Deming de la calidad en Japón en 1989 (Gitlow & Loredó, 1992). Esta fue la primera empresa extranjera en obtenerlo, sin embargo, cuatro años más tarde quebró. Este ejemplo muestra que la forma en que implementaron y evaluaron el sistema de calidad era incompleta y no reflejaba la realidad de la empresa. Solo se valoró qué tan bien se implementaba el sistema de calidad y de mejoramiento continuo. Perdían clientes y experimentaban incremento de pérdidas de energía en la transmisión. Para la obtención del premio, lo que fue calificado fue qué tan “maduro” estaba su sistema de calidad, sin embargo, el concepto de madurez que usaron no incluía el concepto de obtención y sostenimiento de resultados positivos para la empresa.

Con base en el ejemplo anterior, se puede asegurar que un proceso de implementación de un sistema de producción como LC no sirve de nada si las empresas constructoras no logran mejorar la salud general, la productividad, sus ingresos, su rentabilidad y reducir los costos de producción.

3.1.6 Puntos clave de la sección

El beneficio principal de la implementación de LC es la mejora del desempeño del negocio. Los beneficios de rápido impacto y alta visibilidad de la implementación de LC corresponden con la reducción de pérdidas, la mejora de la productividad, la rentabilidad, el mejoramiento del flujo, el aumento de valor y la satisfacción de los interesados. Se evidencian periodos de construcción más cortos y reducción de mano de obra.

Para conducir una adecuada estrategia de implementación y evaluación para la mejora continua, se deben identificar tanto los elementos relacionados con la madurez de LC como las relaciones entre ellos para entender cómo se alcanza la madurez de LC en la GPC, identificación que se presenta en el siguiente capítulo.

3.2 La madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

Alcanzar la madurez, en términos generales, es un proceso que lleva mucho tiempo y hay diferentes elementos que contribuyen a esta madurez y que se relacionan entre ellos de manera sistémica. Para avanzar en la consecución de un proceso maduro, primero se debe estabilizar el sistema. Esta estabilidad se relaciona con la reducción de la variabilidad en los procesos, en los suministros y en la forma de realizar el trabajo. Cuando se empieza la implementación de LC, no se sabe cómo lograr la estabilidad, por lo tanto, es importante conocer dónde se está en ese momento. En esta sección se presentan conceptos relacionados con la madurez de LC en la GPC que conforman una base teórica para abordar el desarrollo del SLC-EModel y el SLC-MM. Estos conceptos se consolidan a partir de consultar a expertos en LC y se sustentan con las referencias académicas estudiadas (Cano et al, 2017).

En la identificación de la madurez de LC, hasta ahora solo se dispone de un modelo de madurez, el Lean Construction Maturity Model (LCMM) desarrollado por Claus Nesensohn en su tesis de doctorado en 2014. Este modelo se enfoca en evaluar la madurez de la organización, donde el proceso de producción es un factor de evaluación. El modelo ha pasado por diversas etapas de validación que aseguran su utilidad para la evaluación de LC; en este caso, la organización puede establecer el impacto del uso al orientar el avance de LC, por lo cual se requiere de varios ciclos de evaluación para concluir sobre esta madurez.

De otra parte, el SLC-EModel ha sido desarrollado para evaluar la madurez de la Gestión de Producción Proyectos de Construcción al integrar LC. En este modelo, la organización forma parte de él, con la participación de los procesos que contribuyen a la producción del proyecto. Este modelo es un artefacto que evalúa, en primera instancia, el nivel de madurez de LC, al medir las consecuencias de su implementación en el sistema de producción; y en segunda instancia, propone acciones para alcanzar el siguiente nivel de madurez.

3.2.1 El concepto de madurez

En su tesis de doctorado, Nesensohn (2014) presenta el concepto de madurez en el contexto organizacional y de proyectos, luego de referir diversas definiciones estudiadas. Sintetiza que

la madurez es un concepto que se utiliza en diferentes contextos de gestión, entre estos, la madurez de la organización, la madurez de la gestión del proyecto y la madurez del proceso. Andersen y Jessen (2003) se refieren a que la madurez de la gestión del proyecto es la capacidad de la organización para manejar diferentes tipos de proyectos de forma eficaz y eficiente, mientras se logran los objetivos del proyecto, es “un estado donde la organización está en perfectas condiciones para lograr sus objetivos” (p. 457). De acuerdo con lo anterior, se hace importante diferenciar entre la gestión de la organización y la gestión del proyecto. En términos de la evaluación de madurez, autores como McCormack y Lockamy (2004) precisan que “el concepto de madurez es un proceso que tiene un ciclo de vida que se evalúa en la medida en que el proceso se define, gestiona, mide y controla explícitamente” (p. 1).

En organizaciones de construcción, la GPC es el principal proceso que se lleva a cabo. La producción del proyecto requiere de las personas, del sistema de producción y de los diferentes procesos de la gestión organizacional al servicio del proyecto. Entonces, tiene sentido precisar que la madurez de la GPC se alcanza de manera independiente a la madurez de la organización. A falta de una definición para la madurez de LC en el contexto de la GPC y el uso de LC, la investigadora plantea que en la definición de madurez de procesos deberían considerarse conceptos tales como la capacidad de desarrollar, evaluar, sostener y mejorar continuamente un estándar para un proceso.

Definición de la madurez

Es aquel estado de máximo desarrollo, o estado de excelencia, que ofrece la capacidad de volver realidad el objetivo proyectado con el más eficiente uso de los recursos disponibles. Es un estado que se va alcanzado paulatinamente al transitar por diferentes niveles de madurez, que permiten escalar hacia un estándar máximo, un nivel de excelencia de referencia para el contexto, un “Gold Standard” (Cano y Rivera, 2015).

3.2.2 Evaluar la madurez

La madurez se evalúa con ayuda de herramientas desarrolladas para el campo específico. Estas herramientas son modelos que contienen un conjunto de procesos organizados en niveles de madurez que se alcanzan de manera progresiva. De acuerdo con Ibbs y Kwak

(2000), la utilidad de los modelos de madurez en el campo de la gestión de proyectos es propiciar un mejor desempeño de los proyectos, es así que “la madurez de PM es un nivel bien definido de sofisticación que evalúa las prácticas y los procesos actuales de gestión de proyectos de una organización” (p. 1) y ofrece rutas de mejora para estos procesos. El modelo de madurez permite disponer de información comparativa que puede ser usada para trazar un plan de desarrollo organizacional e identificar las fortalezas y debilidades de la organización con respecto a sus áreas de proceso (Ramírez, 2009). Existe una amplia variedad de modelos de madurez en diferentes sectores, el más conocido es el Capability Maturity Model Integration (CMMI, por sus siglas en inglés), el cual ha sido tomado como referencia para el desarrollo de algunos modelos de madurez como el SPICE (Ehsan et al – 2010).

Los Modelos de Madurez (MM) son referentes prácticos que ayudan a las organizaciones a medir el punto en que se encuentran en el camino hacia la excelencia, analizando las brechas para alcanzarla. Sirven como marco de trabajo referencial, como una herramienta de diagnóstico organizacional, convirtiéndose en instrumento de desarrollo e incentivo para el alcance del éxito y la competitividad organizacional frente a los retos de la globalización. Al aplicarlos, las organizaciones desarrollan habilidades de gestión y consolidan estructuras para la creación de valor de manera continua y sostenida por medio de procesos de mejoramiento e innovación que contribuyen a reducir la brecha de competitividad en temas como productividad y efectividad. Sirven de punto de referencia para que las organizaciones desarrollen las mejores prácticas referenciadas con el objetivo de entregar una oferta de valor claramente diferenciada, sostenible e innovadora, que asegure la productividad y la competitividad.

3.2.3 La madurez de Lean Construction en la gestión de producción de proyectos de construcción

Lean fue propuesta en 1992 para su aplicación en construcción. Algunos de los expertos consultados en esta investigación coinciden en expresar que aún es muy temprano para hablar de la existencia de organizaciones de construcción maduras en LC, a pesar de que alrededor del mundo existen organizaciones de construcción con altos niveles de desempeño que están integrando LC como un sistema de gestión de la producción. De acuerdo con los expertos

consultados, se pueden identificar características que muestran cómo se va manifestando la madurez de LC en la GPC en aspectos particulares que se describen en esta investigación.

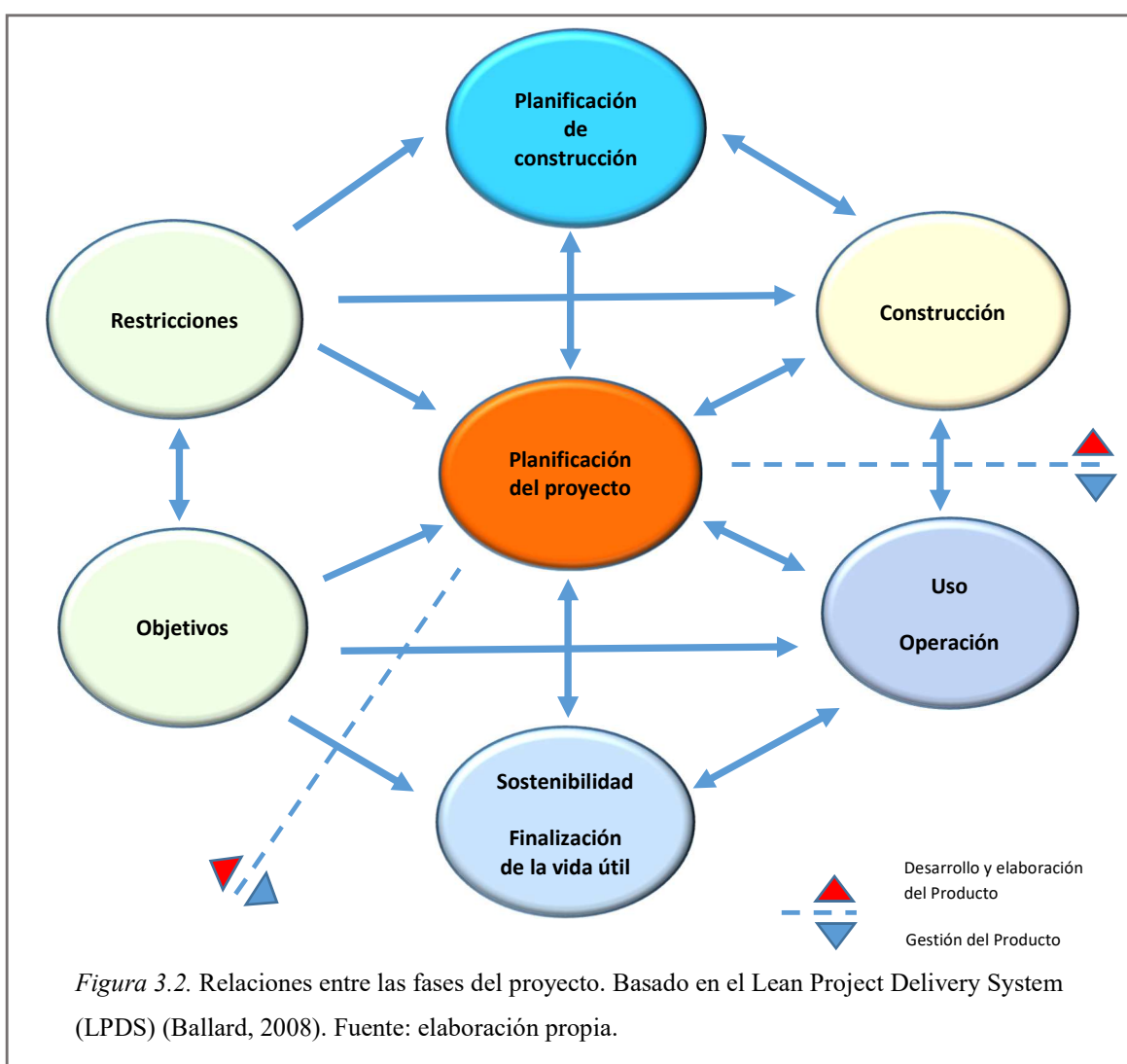
La integración de Lean en construcción, como en otros sectores, requiere de la participación y el compromiso de la Alta Dirección. No solo en términos financieros, sino también en el direccionamiento estratégico y disponibilidad de recursos humanos en todos los niveles jerárquicos. Este direccionamiento estratégico promueve un cambio en la cultura de la organización y las personas en ella (Green, Harty, Elmualim, Larsen y Kao, 2008). Por consiguiente, la expectativa de mejora de la eficiencia de la producción va consolidándose y es entonces cuando aparece el interés de conocer el estado de mejora del Sistema de Gestión de producción de proyectos de construcción, en otras palabras, el interés en identificar si integrar Lean a la GPC ha sido una buena decisión. Esta identificación se realiza mediante la evaluación organizacional con el uso de Modelos de Madurez. En este sentido, es conveniente primero conocer qué es la madurez de LC en la GPC antes de hablar de modelos de madurez.

Muchas empresas de construcción están realizando una transición hacia un sistema de producción de LC como una estrategia para mejorar su productividad, eliminando problemas relacionados con el mal desempeño de los proyectos, incumplimiento de contratos, mala calidad de la construcción, sobrecostos, entre otros (Costa *et al.*, 2015). En general, la industria de la construcción muestra poco desarrollo en el área de producción tanto en la obra como en cada una de las fases del proyecto; asimismo, presta poca atención a las actividades y a la gestión del flujo de producción (Vieira, 2006). La poca productividad en comparación con otras industrias, falta de transparencia, de coordinación y de comunicación entre los actores involucrados, la baja calidad, la generación de errores imprevistos, la falta de una correcta distribución de información, la inseguridad industrial, la corrupción, entre otros, son problemas que pueden ser abordados de manera exitosa con la implementación de LC (Bashir *et al.*, 2010; Bashir, Suresh, Proverbs y Gameson, 2011).

3.2.4 Integración de las fases del proyecto

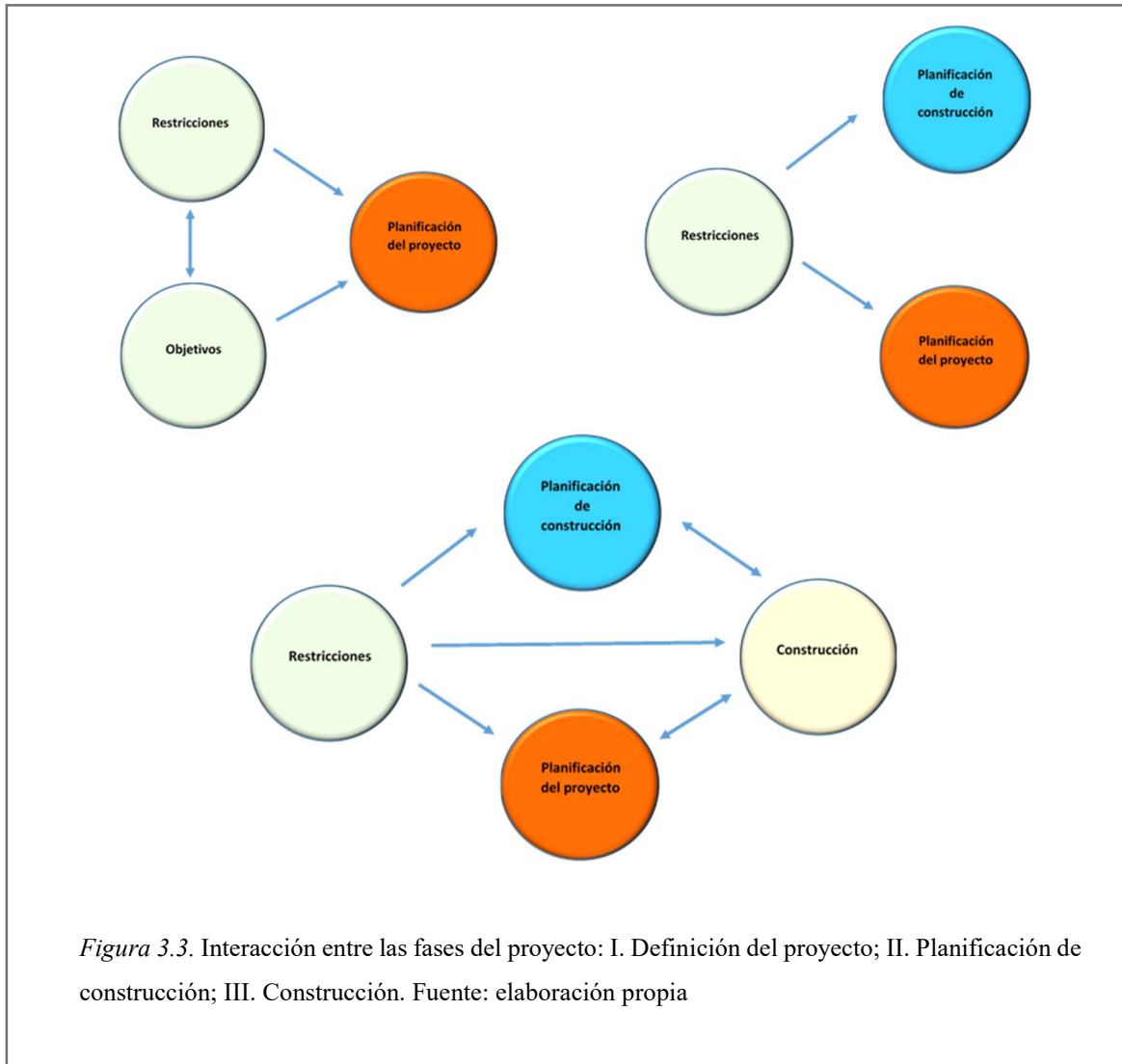
Un proyecto se realiza en fases, y una de las fases de concepción del producto más importantes y menos explorada es la de planificación, la cual define cómo es diseñado el

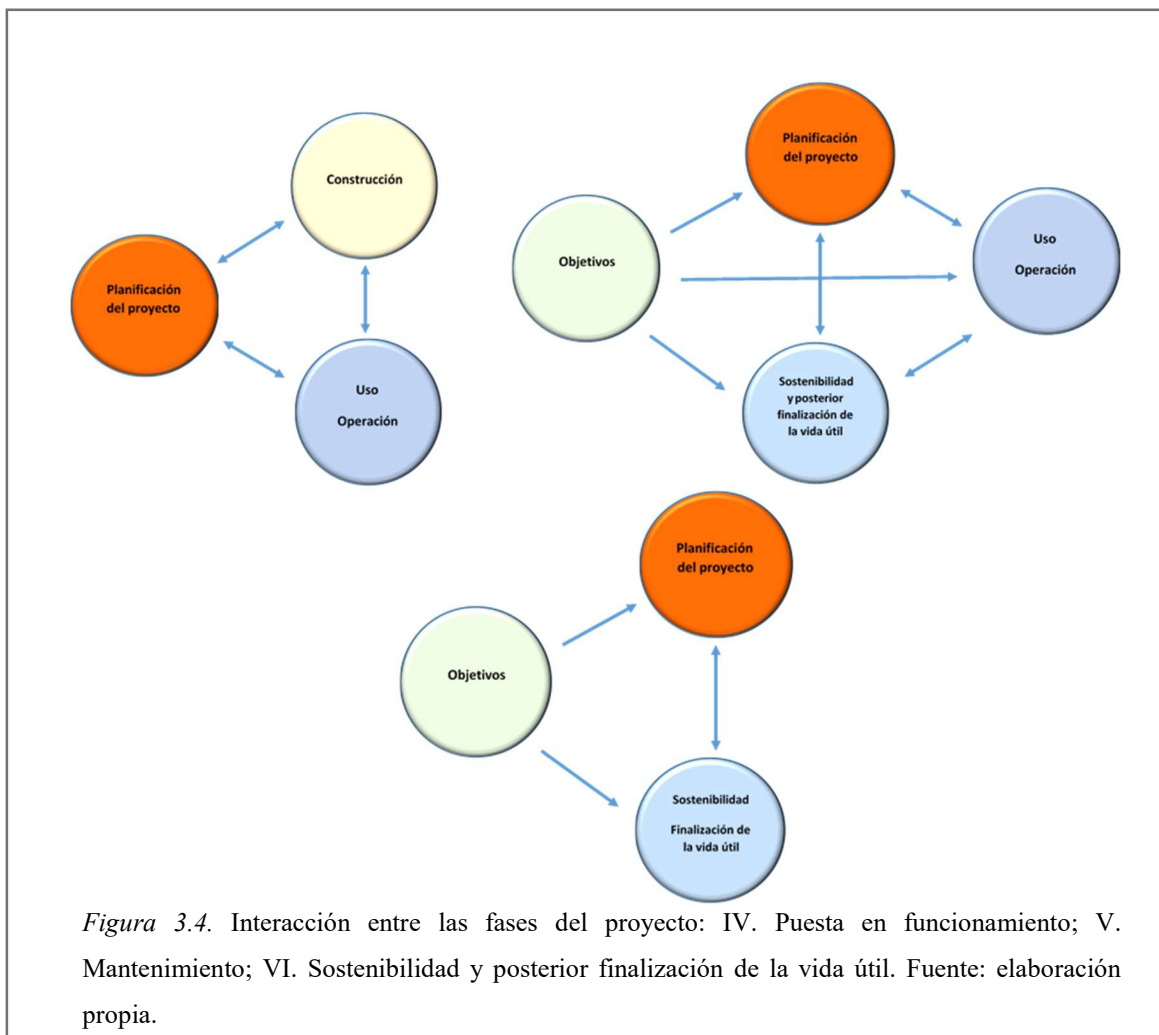
producto, cómo va a ser construido y cómo va a ser operado. Es decir, integrar una visión de desarrollo del producto con 7D⁴. Desde la concepción del producto es muy importante tomar en consideración sus alcances e integración con las otras fases para identificar con precisión la adopción de herramientas y conceptos Lean para la fase de construcción. Esto contribuye a simplificar el esfuerzo de identificar problemas desde el diseño y apoyar la toma de decisiones en el campo. En las figuras 3.2, 3.3 y 3.4 se propone un esquema de relaciones del desarrollo del proyecto que toma como base el Lean Project Delivery System (LPDS) (Ballard, 2008). En esta investigación se propone una adaptación de este modelo, el cual se ha denominado LPDS-F6 debido a que se configura con seis fases de desarrollo del proyecto.



⁴ Building Information Modeling (BIM), desde la concepción del modelo en 3D, la programación 4D, el control del costo de construcción 5D, la integración de criterios de sostenibilidad 6D y la gestión del mantenimiento 7D.

En este esquema (figura 3.2), el elemento articulador es la Planificación del Proyecto y, como se puede apreciar en las figuras 3.3 y 3.4, se resalta la relación entre esta fase y las otras fases del desarrollo del proyecto.





Un proyecto maduro parte de la evaluación: de post-ocupación, de cliente, de servicios de asistencia técnica, de producto y de calidad del producto final. El concepto Lean permite contar con un producto de mejor calidad, ya que la calidad del producto final es fundamental para el usuario, dado que el cliente es quien va a recibir los beneficios del uso de los principios y las herramientas.

En general, la integración de las fases del proyecto según el LPDS-F6 es una estrategia de desarrollo del proyecto que contribuye al alcance de la madurez de la gestión que debe ser llevada a cabo para la obtención del producto según la oferta de valor propuesta.

3.2.5 Categorías de madurez

En el aparte 3.1.1 se hace referencia a los principales componentes en que está descrito el sistema de producción. Estos componentes se denominan categorías, las cuales agrupan otros elementos de madurez que se irán explicando más adelante. En cada una de las fases del proyecto están presentes las tres categorías: (a) Personas, (b) Sistema de Producción, y (c) Soporte de la Organización para la Producción.

3.2.5.1 Personas

Las personas son la base del desempeño de cualquier proceso. Son las personas quienes ponen en funcionamiento el proceso de producción en cada uno de los roles que se integran al proyecto. Esta categoría contiene los elementos de madurez relacionados con las personas que están involucradas con los procesos que contribuyen al desarrollo del proyecto de construcción. Se clasifican en dos factores: (a) el trabajo en equipo, el cual integra aspectos de educación, entrenamiento y actitud para el trabajo en equipo, y (b) el liderazgo LC, que integra actitud y cultura en procesos de desarrollo LC y el desarrollo de liderazgo LC.

El hecho de que una persona sea capaz de aprender múltiples habilidades, que aprenda a estandarizar las cosas que hace en su trabajo, a proponer mejoras a los procesos en que interviene, a ejecutar proyectos de mejoramiento y evaluar el nuevo estado para realizar un nuevo ciclo de mejoramiento, es una clara evidencia de madurez. Esto fortalece su participación en los procesos de mejoramiento continuo en todas las fases.

En términos de modelos de madurez que se enfoquen en las personas, se destaca el People Capability Maturity Model (P-CMM) desarrollado por Curtis, Hefley y Miller (2009). Este modelo se enfoca en aspectos particulares del desarrollo de las personas en la organización, toda vez que son ellas quienes llevan a cabo los procesos. En el P-CMM se sigue un proceso de evolución que va desde prácticas *ad hoc* hasta la consolidación de prácticas maduras que ayudan a incrementar de manera continua la capacidad de la fuerza laboral. Este modelo se fundamenta en diez principios que se muestran a continuación y que contribuyen específicamente en esta categoría para el desarrollo del SLC-EModel. Estos principios, traducidos del P-CMM (Curtis, Hefley y Miller, 2009), son:

- En organizaciones maduras, la capacidad de fuerza de trabajo está directamente relacionada con el desempeño del negocio.
- La capacidad de la fuerza laboral es un asunto muy importante relacionado con aspectos de competitividad y una fuente de ventaja estratégica.
- La capacidad de la fuerza laboral debe ser definida en relación con los objetivos estratégicos de la organización.
- El énfasis en el desarrollo del conocimiento cambia el enfoque que permite pasar de los elementos del trabajo a las competencias de la fuerza laboral.
- La capacidad puede medirse y mejorarse en múltiples niveles de la organización, incluidos individuos, grupos de trabajo, competencias de la fuerza laboral y la organización.
- Una organización debe invertir en la mejora de la capacidad de las competencias de la fuerza laboral que son más críticas para mejorar su capacidad en función del negocio.
- La Gestión Operativa es responsable de la capacidad de la fuerza de trabajo.
- La mejora de la capacidad de la fuerza de trabajo puede llevarse a cabo como un proceso integrado de las prácticas y procedimientos probados.
- La organización es responsable de proporcionar oportunidades de mejora, y los individuos son responsables de tomar ventaja de ellas.
- Debido a que las tecnologías y formas de organización evolucionan rápidamente, las organizaciones deben mejorar continuamente las prácticas de la fuerza de trabajo y desarrollar nuevas competencias para la fuerza laboral.

En la categoría de personas, se identifican dos elementos de madurez o factores de madurez (FM), los cuales agrupan a los atributos responsables de la madurez en el sistema. Ellos son (a) liderazgo Lean en construcción y (b) trabajo en equipo.

En adelante, para cada una de las categorías se presentan conceptos contruidos a partir del conocimiento de los expertos. Estos fueron consultados acerca de las características que demuestran madurez en cada categoría, en este sentido, para la categoría Personas se asocian diversas características que más adelante se relacionarán con los atributos del SLC-EModel.

- **Liderazgo Lean en construcción.** Se refiere a aspectos relacionados con la forma de actuar y el comportamiento que desarrollan los seres humanos para la realizar sus actividades. En este FM se incluyen aspectos relacionados con el comportamiento humano, las formas de pensar y de actuar, la cultura y las costumbres para el desarrollo de líderes. Los líderes son las personas que motivan y promueven el cambio. Se busca que ellos se desarrollen en todos los niveles en la organización y que sean personas empoderadas de las acciones de implementación, uso y desarrollo de LC. En la medida en que se cuenta con personas con una visión diferenciada, con conocimiento Lean, la madurez pasa también por la formación y desarrollo de personas que impactan positivamente el desarrollo del proyecto.
- **Trabajo en equipo.** Este factor integra aspectos relacionados con la educación, el aprendizaje y el entrenamiento de las personas conformadas en grupos de trabajo para participar en procesos LC. Estos procesos en equipo permiten transmitir conocimientos, valores, costumbres y formas de actuar. La formación es el proceso por el cual una persona aprende y se instruye en conocimiento con lo cual se busca generar un cambio cultural, moral y conductual. Su actitud para el trabajo en equipo permite a las personas conformar equipos de trabajo que son la base para la realización de cada una de las tareas del proyecto, toda vez que en este tipo de proyectos se requiere el trabajo en equipo de los grupos de trabajo. Se busca desarrollar equipos de trabajo empoderados y comprometidos con el desarrollo del proyecto.

3.2.5.2 Sistema de Producción

El sistema de producción integra toda la gama de actividades que se requieren para llevar un producto o servicio desde su concepción, a través de las diferentes fases de producción, hasta la entrega al consumidor final, y la disposición después de su uso.

En el desarrollo del Sistema de Producción se busca realizar, entre otras, la implementación completa de las herramientas LC seleccionadas, la incorporación de pruebas piloto, más enfoque y atención a las necesidades del cliente, una perspectiva holística y la solución de problemas de raíz. Se busca también estandarizar y garantizar diseños completos y precisos, establecer un sistema de incentivos, así como despertar la conciencia de que el proceso correcto producirá el resultado correcto.

Un sistema de producción que madura es aquel que cuenta con la disciplina del mejoramiento continuo, que es capaz de verse a sí mismo de forma crítica, que es capaz de adaptarse y de repetir el ciclo. Un sistema con un alto nivel de madurez difícilmente llega a considerarse a sí mismo terminado o perfecto; es capaz de lograr que las cosas se hagan como deben hacerse, que se estandaricen, que se repitan, que se conserven y se mejoren para luego subir de nivel y realizar nuevamente el ciclo. Cada mejora conduce a que las personas aprendan, estandaricen, repitan y finalmente se evalúen para mejorar y dar el salto al siguiente nivel.

La encargada de la producción en una empresa constructora es el área de gestión de proyectos. En esta se desempeñan muchas funciones que el corporativo realiza; es la estructura administrativa que sostiene la empresa. El proyecto exige servicios de la organización, como, por ejemplo: ordenar materiales, lo que se hace a través del área de Compras y del área Financiera que autoriza los pagos. Si se requiere personal, el área de Recursos Humanos debe proveerlo, sea de otros proyectos o mediante convocatoria pública.

Una visión compartida por los expertos de la verdadera madurez establece que se alcanza en el momento en el cual las empresas que aplican los principios utilizan herramientas, construyen una cultura y demuestran que los resultados son cada vez mejores para el desempeño del proyecto. Esto se aprecia cuando la calidad mejora. Esta mejora de calidad se ve con la reducción de reclamos posventa, la reducción de reprocesos y el cumplimiento en los plazos, entre otros, esto en función de haber desarrollado un proceso adecuado.

En general, es muy importante demostrar que hay resultados, esto se lleva a cabo con base en los indicadores reales de mejoramiento del desempeño en los factores claves del proyecto, lo cual permite identificar el avance del proceso de madurez.

Algunas de las acciones que contribuyen con la madurez del Sistema de Producción resaltadas por los expertos se presentan a continuación:

- Los procesos deben estar documentados y estandarizados; deben existir mecanismos para mejorar los procesos y para garantizar que se aplique mejoramiento continuo.
- Verificar la continuidad de los procesos y disponer de indicadores que permitan comparar los estados del proceso de producción.

- Propiciar un flujo continuo de producción y proveer de un adecuado proceso logístico sincronizado con un sistema de la planificación y control del trabajo.
- Utilizar técnicas que permitan desarrollar un sistema de producción *pull*.
- Utilizar herramientas de producción para llevar a cabo un proceso más flexible y desarrollar técnicas de producción más flexibles con empleados más flexibles.
- Adaptar prácticas y herramientas específicas a las diferentes fases del proyecto.

Esta categoría incluye dos FM: (a) el mejoramiento del sistema de producción y (b) el mejoramiento de la producción.

- **Mejoramiento del Sistema de Producción**

Este FM recoge las acciones e intervenciones que contribuyen a mejorar el Sistema de Producción para mejorar el flujo, reducir las pérdidas en el sistema y estabilizarlo, de manera que la producción sea más eficiente. El Sistema de Producción soporta la producción del proyecto de construcción.

- **Mejoramiento de la Producción**

En este FM se integran acciones e intervenciones para incrementar la producción soportada en una mejoría constante del Sistema de Producción. Con relación a la mejora de la producción se establecen condiciones para identificar la mejora de la productividad resultado de un SPPC en continua mejoría.

3.2.5.3 Soporte Organizacional a la Producción del Proyecto

Las organizaciones, de acuerdo con Barahona (1988), son “estructuras sociales en las que el conjunto de sus integrantes desempeña un sistema de actividades, coordinado de forma consciente y con racionalidad limitada, en la búsqueda de determinados objetivos” (p. 226). Las organizaciones están compuestas por sistemas interrelacionados que cumplen funciones especializadas.

En esta categoría de FM se agrupan aspectos relacionados con la estructura de la organización, los medios o procedimientos necesarios para llevar a cabo un fin determinado, el flujo o manejo de recursos, comunicación, entre otros. Asimismo, se han definido tres

factores: (a) compromiso de la Alta Dirección, que incluye sus actitudes; (b) Soporte operativo a la producción; y (c) Ambiente de trabajo.

Al mismo tiempo que el proyecto realiza requerimientos razonables y cumple las condiciones del corporativo, se espera que el corporativo garantice el cumplimiento de esas condiciones ofrecidas, porque de lo contrario el proyecto se afecta, se atrasa y resulta más costoso. Desde este punto de vista, valdría la pena que la organización tuviera un sistema de Lean Management para que las demás áreas cumplan con el acuerdo que tienen con el área de producción.

Una relación madura es aquella en la que todas las partes cumplen con el contrato, son capaces de actualizar el contrato, de actualizar sus necesidades para ir mejorándolas y de proponer modificaciones a los procedimientos para mejorarlos. La misma lógica que aplica producción de manera aislada debe ser aplicada en su relación con otras áreas de la empresa. En este sentido, sería raro que una empresa que implemente una gestión Lean de proyectos de construcción, no aplique Lean Management.

Un sistema de producción que usa LC debe ser un sistema estable, repetible, eficiente, que haga buen uso de los recursos, predecible en su comportamiento. Debe proporcionar ambientes de trabajo seguros para las personas, de tal manera que si un operario observa que la empresa no se preocupa por las medidas de seguridad, por los equipos, por los protocolos de seguridad, y no tienen un buen tratamiento de los accidentes y de las inconformidades, rápidamente va a sospechar que la empresa no lo aprecia, no lo estima, no lo cuida, y si siente que la empresa no se preocupa, entonces no tendría razones para ser leal a ella y tener una actitud proactiva frente al trabajo.

Es importante contar con un alto nivel de madurez en cuanto a la conceptualización y el entendimiento de la filosofía. Esta importancia radica en que el despliegue de LC permita al proyecto cumplir sus metas. No vale de nada contar con un alto nivel de madurez, si al final esto no lleva a una mejora en el sistema de producción y a obtener los mejores resultados del proyecto y en todos los niveles de la organización. Esta es una propiedad emergente del sistema, la manera en que la implementación mejora el desempeño del sistema. Esta mejora debe estar monitoreada por medio de indicadores. Independiente de la utilización de herramientas, se espera que se demuestre que se está enfocado en realizar acciones de

mejoramiento más que en estandarizar. El resultado final es el proceso de mejoramiento continuo, desarrollado y sostenible. Son aspectos que demuestran madurez en la GPC:

- Los acuerdos de servicio entre las áreas del proyecto son fundamentales para saber si una empresa está madurando o no. Se debe resaltar el concepto de cliente interno.
- Articular los procesos de la organización para apoyar la cadena de valor.
- Verificar que la información desarrollada en la etapa de planificación llegue a la construcción y garantizar que no haya reprocesos.
- Verificar cómo se desarrolla la comunicación y después de más de un ciclo de proyectos se puede verificar la mejora.
- La gestión tecnológica y la innovación.
- La gestión logística del PC en todas sus fases.
- La gestión contractual.

• **Compromiso de la Alta Dirección**

En este atributo se integran aquellos aspectos que están relacionados con los medios o las ayudas que se tienen para conseguir un fin o satisfacer una necesidad desde la Alta Dirección, la cual proporciona los recursos adecuados para apoyar la transformación cultural, tener una mentalidad de orden y contar con la participación de todos en la organización. De igual manera, propicia la estrategia con la que se establece un equilibrio de los intereses de todos los participantes, se incorporan lecciones aprendidas, el intercambio de información de manera apropiada, la mejora de la coordinación y la cooperación, y la reducción de los niveles jerárquicos. Direcciona el desarrollo de estrategias para garantizar una comunicación efectiva y abierta, establecer relaciones más cercanas y colaborativas con proveedores, clientes y consultores, apoyar la transformación del pensamiento, los métodos de trabajo, promover la integración, la coordinación y la cooperación, entre otros.

• **Soporte Operativo a la Producción**

El área de producción en una empresa constructora es la de gestión de proyectos. En ella, el corporativo desempeña muchas funciones; es la estructura administrativa que sostiene la

empresa. Así, si la gestión de la producción implementa LC, básicamente todos los procesos deben estar estandarizados y se deben conocer, para cada una de las áreas de la organización, los tiempos que demoran en atender las solicitudes del proyecto. Una de las cosas que deberían suceder es que las relaciones entre los proyectos de construcción y las áreas corporativas se estandaricen y se conozcan los procesos entre dichas áreas en función del proyecto.

- **Ambiente de Trabajo**

El ambiente de trabajo se construye con la participación de todas las personas. Por ello, la seguridad en el sitio de trabajo adquiere mucha importancia para el desempeño del proyecto en todas sus fases. Entonces, en términos de madurez, en las relaciones entre la gestión de la empresa y la gestión completa del proyecto, cobra importancia hacer énfasis en que se está estudiando la GPC y no la gestión del corporativo. Así, si la gestión de la producción implementa Lean, el ambiente de trabajo debería experimentar una mejora que propicie la mejora continua.

3.2.6 Indicadores de madurez

Considerando que se busca identificar la madurez de LC, se genera una idea de indicadores asociados con el estado de madurez que el SPPC vaya adquiriendo con la implementación de LC. Uno de los aspectos en la identificación de la madurez de LC en la GPC son los resultados observables de mejoramiento. En el proceso, uno de los aspectos a considerar cuando se trate de decidir si la madurez está evolucionando, son los resultados. Si no se ven resultados que demuestren mejoras, entonces el proceso no está avanzando.

Un nivel de implementación indicado con un número no dice mucho, los resultados pueden ser alterados, pues si la persona sabe cómo será evaluada, sabrá cómo comportarse. Entonces, los indicadores deben ser a prueba de fraude, deben ser claros, que muestren resultados de factores que están presentes al mismo tiempo.

Estos indicadores se refieren al desempeño del SPPC de manera general, el indicador global de madurez, el índice global de madurez (IGM); al desempeño de cada uno de los conceptos que agrupan elementos que evidencian la madurez, los indicadores locales de madurez

(ILM); al desempeño de cada uno de los elementos de madurez que componen el concepto de madurez cuyo indicador se baja en los niveles individuales de madurez, o la madurez del atributo identificado con el índice de madurez del atributo (IMA). Estos índices se resumen a continuación.

Tabla 3.1. Indicadores de Madurez y forma de medición.

Índice de Madurez de Atributos IMA	Índice Local de Madurez ILM	Índice Global de Madurez IGM
Identifica el alcance de la madurez del atributo al evaluar cada una de las características asociadas a él en cada una de las fases del proyecto.	Identifica el alcance de la madurez de cada factor de madurez en el modelo. Esta madurez se alcanza a partir de la madurez de los atributos asociados al factor y la influencia de otros factores que le preceden.	Identifica el alcance de madurez de LC en el sistema de producción de proyectos de construcción.
Se evalúa en campo cada atributo para cada fase del proyecto con ayuda de la herramienta (SLC-MAET).	Se calcula con ayuda del SLC-QM que es la herramienta que califica la madurez a partir del resultado de la evaluación	Se calcula por medio del SLC-QM a partir de los resultados de la madurez de los factores.

Estos índices están directamente asociados con los elementos del modelo. Los índices propuestos están agrupados en los índices de la presente investigación y los propuestos para investigaciones futuras, los cuales se presentan en el Capítulo 4.

Una evaluación del estado de madurez es la “foto” instantánea del estado del sistema. Podría decirse que es la “foto” que muestra lo que está sucediendo luego de la aplicación de planes y proyectos de mejora para elevar el desempeño del Sistema de Producción del Proyecto de Construcción. Después de obtener la información del nivel de madurez del estado, se da inicio nuevamente al ciclo de mejoramiento, es por esto que los indicadores para el modelo en términos del IGM y los ILM corresponden a indicadores de resultados. En tanto se llevan a cabo los planes de mejoramiento, se monitorean los índices relacionados con los atributos, los cuales corresponden a indicadores de proceso seleccionados para mostrar de manera

precisa el estado actual. Con los ILM se construyen los perfiles de madurez que muestran el estado de madurez alcanzado por la GPC con la utilización de LC.

De otra parte, es importante definir cuáles son los tipos de mejora en eficiencia y en resultados que se esperan obtener con la implementación de LC. Un ejemplo en manufactura puede ser la reducción en el número de productos defectuosos, un aumento medible en el uso de los operadores y materiales. Entonces, ¿en LC en la GPC qué es el equivalente? Se sugiere plantear este tipo de mejoras esperadas en eficiencia consistentes con el tipo de proyecto y el entorno en que se desarrolla:

- Proyectos que cumplen con la promesa de valor en términos de costo, tiempo, alcance y calidad.
- Proyectos con bajos o nulos indicadores de accidentalidad y pérdida de tiempo a causa de estos.
- Aumento en la rentabilidad del negocio en términos precisos, 10 % a 15 %.

3.2.7 Modelos de Madurez como herramientas de mejoramiento

Los modelos de madurez de capacidades no son exclusivos de los sistemas de información, ámbito donde tuvieron su origen. Estos incluyen niveles que representan el desarrollo del proceso en evaluación y los elementos de medición para determinar el nivel de madurez alcanzado. Con estas evaluaciones de las capacidades del sujeto de interés, se comprueban sus competencias para mantener un desempeño consistente en el tiempo y son utilizadas para la mejora en el proceso en que se busca madurar, considerando estrategias organizacionales.

El objetivo de esta sección es desarrollar una base conceptual respecto de los MM e integrar los elementos básicos para la construcción del SLC-MM, tales como: definiciones, selección de los niveles de madurez luego de realizar un estudio de MM potenciales para ser adaptados a la integración de LC en la GPC principalmente.

3.2.8 El Modelo de Madurez

Un Modelo de Madurez es una forma de representar de manera sencilla los elementos esenciales de los procesos eficaces (Paulk, Curtis, Chrissis y Weber, 1996). Este concepto presentado por Crosby (1979), en su representación del Cuadro de Madurez de la Gestión de la Calidad, o Quality Management Maturity Grid (QMMG, por sus siglas en inglés), tiene como base los conceptos de control estadístico de procesos y mejora continua integrados en el desarrollo de Paulk *et al.* (1996). Con el modelo se puede conocer la situación actual de los procesos organizacionales respecto a la Gestión de la Calidad. Crosby (1979) precisa que los costos de la calidad referidos al comportamiento de las ventas es una de las maneras de cuantificar los beneficios de pasar de un nivel de madurez a otro.

Más adelante, se desarrolló el Modelo de Madurez de la Capacidad de los Procesos por la Universidad Carnegie-Mellon para el Software Engineering Institute (SEI), por solicitud del Departamento de Defensa del Gobierno Federal de los Estados Unidos de América, para los procesos de desarrollo de *software* en 1987, el Modelo de Madurez de Capacidades para el Desarrollo de *Software*, o Capability Maturity Model for Software (SW-CMM, por sus siglas en inglés). A partir de 2001 se presentó una nueva versión el modelo de integración de Modelos de Madurez de Capacidades, o Capability Maturity Model Integration (CMMI, por sus siglas en inglés), que contribuye a la mejora y evaluación de procesos para el desarrollo, mantenimiento y operación de sistemas de *software*. Los modelos de capacidades realizan medición a través de niveles, con esta medición las organizaciones pueden guiar la mejora de sus procesos (Hwang, 2009). Los niveles muestran el estado de los procesos en su camino hacia la madurez (Crosby, 1979), lo cual ha sido adoptado por muchas organizaciones como forma de realizar una autoevaluación para determinar las estrategias que se deben seguir (Wiele, Brown, Millen y Whelan, 2000).

En su investigación, Wendler (2012) plantea, desde una perspectiva lingüística, que:

(...) el propósito de los modelos que se ocupan de la madurez es describir las condiciones en las que determinados objetos examinados alcanzan los mejores (perfecto) estados para el propósito previsto. Por ejemplo, estos objetos pueden ser las capacidades de desarrollo de *software*. Además, tiene que haber un estado “final” de la madurez (plenitud de crecimiento) en el que ningún desarrollo adicional es posible (p. 1318).

Sin embargo, esta investigación considera que no hay un estado final de madurez, pues cuando se alcanza el nivel más alto, se desafía el proceso para ir más allá, de esto se trata el mejoramiento continuo.

3.2.8.1 ¿Qué evalúa el Modelo de Madurez?

Un modelo de madurez evalúa *el nivel en que se logra la excelencia*; se compone de factores, criterios de valoración y niveles de madurez. Estos modelos son referentes prácticos que ayudan a las organizaciones a medir el punto en que se encuentran en el camino hacia la excelencia, analizando las brechas para alcanzarla. Así mismo, sirven como marco de trabajo referencial, como una herramienta de diagnóstico organizacional, convirtiéndose en instrumento de desarrollo e incentivo para el alcance del éxito y la competitividad organizacional. Un aspecto que no debe perderse de vista es el hecho de que la evaluación y el MM en sí mismos deben ser usados para identificar potenciales mejoras.

Al aplicar un MM, las organizaciones desarrollan habilidades de gestión y consolidan estructuras para la creación de valor de manera continua y sostenida por medio de procesos de mejoramiento e innovación que contribuyen a reducir la brecha de competitividad en temas como productividad y efectividad. Las organizaciones toman medidas estratégicas para que todas las personas en ellas hablen el mismo idioma para el mejor desempeño del proyecto. El crecimiento de las empresas depende del compromiso del personal, por esto se debe motivar continuamente al personal para influir en que siempre pueden ser mejores. En este sentido, la madurez de cada empresa depende del compromiso y conocimiento de todos los interesados en la Gestión de la Producción del Proyecto. En esto, la comunicación juega un papel muy importante para garantizar la adecuada interpretación de la información.

Esta investigación clasificó y estudió 58 MM y herramientas de evaluación del desempeño de LC en diferentes entornos: tecnologías de información, gestión de proyectos, manufactura y construcción. El propósito de esta revisión era identificar el MM más apropiado para adaptarlo con el fin de evaluar la madurez de LC en la GPC; sin embargo, no se seleccionó ninguno de estos modelos y se desarrolló uno nuevo, debido a la forma en que se desenvuelve la investigación, lo que se explica con el desarrollo del modelo en el Capítulo 4.

3.2.9 Evaluar la madurez, un proceso organizacional participativo

Los MM son herramientas pertinentes de evaluación para que las organizaciones puedan guiar sus esfuerzos de transformación a nivel empresarial. Esto se puede realizar al conocer el estado actual de la organización, sus fortalezas y debilidades, la participación de las personas, las necesidades que requieren de acciones inmediatas, etc. En función de transformaciones que hagan de la organización más eficiente y produzca mejores resultados para beneficio del negocio (Perkins, Abdimomunova, Valerdi, Shields y Nightingale, 2010). Sin embargo, la evaluación debe considerar un alcance mayor para que se pueda obtener el beneficio que se requiere. Esto implica que todas las personas involucradas en el desarrollo del SP comprendan claramente la importancia de la evaluación para adelantar decididos procesos de mejora.

De acuerdo con Crosby (1979), la evaluación debe ser un proceso participativo, que promueva una autoevaluación como un proceso continuo en el propósito de buscar la mejora continua. En este sentido, se debe planear cuidadosamente el proceso de evaluación para garantizar que se lleve a cabo efectiva y eficientemente, y que los resultados de la evaluación sean precisos y confiables (Abdimomunova y Valerdi, 2010). Los resultados deben ser evaluados también de manera participativa para que se conviertan en planes consensuados y comprometidos, planes que son previstos y desarrollados por quienes están involucrados con el cambio. Como recomendación de esta investigación, deben ser producto de la autoevaluación en un entorno LC.

3.2.10 Definición del Modelo de Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

De acuerdo con Andersen y Jessen (2003), la evaluación de madurez está sujeta a un alto nivel de subjetividad, la cual se reduce con el uso del MM de acuerdo con el nivel de precisión. El MM representa un estándar con el cual se compara para llevar a cabo la evaluación (Tapia, Daneva, Van Eck y Wieringa, 2008). En razón a la necesidad de contar con una referencia teórica de trabajo, en esta investigación, la autora define el Modelo de Madurez de LC en la GPC (SLC-MM) como el estándar del ciclo completo de la gestión del

SPPC con el uso de LC. Este estándar permite identificar alcance progresivo de las características de excelencia de cada uno de los elementos que lo componen.

De acuerdo con Nesensohn (2014), “los MM son indispensables para las organizaciones cuando quieren medir la corriente de capacidad organizativa” (p. 36).

Los MM son motores de cambio con un enfoque más sistemático y ordenado que reduce los errores y garantiza la calidad, mientras se genera una base comparable de la evolución de la madurez. De igual manera, los MM ofrecen información para entender la evolución del sujeto en estudio en el tiempo. Esta evolución se percibe en los factores de estudio, los FM y los elementos asociados a ellos. Esta afirmación de la autora se contrasta con los estudios de Tapia *et al.* (2008), Khoshgoftar y Osman (2009) y Wang, Xiao, Li y Li (2011), referenciados por Nesensohn (2014).

3.2.11 Niveles de madurez del Modelo de Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

De acuerdo con la revisión bibliográfica y la consulta a expertos, se identificaron los cinco niveles de modelos de madurez más comunes. Estos niveles ofrecen escalas más fáciles de entender para clasificar un estado. Cinco niveles permiten distinguir entre los niveles bajos (1.0 para procesos de madurez incipientes, 2.0 para procesos bajos de madurez con algún grado de avance, el intermedio 3.0 y los altos 4.0 y 5.0.

El SLC-MM cuenta con cinco niveles de madurez, donde el primero puede ser usado como el estándar que permite evaluar el estado de una organización, cuyo interés es iniciar la implementación de LC. Con los tres primeros niveles se estabiliza el sistema y en los dos últimos está inmerso un ciclo reforzador de control y mejoramiento.

3.2.12 Niveles de madurez de Modelos de Madurez de Referencia

El primer modelo de madurez del que se tiene cuenta fue propuesto por Philip B. Crosby en 1979, a partir de entender que las organizaciones pasan por cinco etapas de madurez en cada una de las categorías en que se desarrolla la gestión. Más adelante, el CMMI fue desarrollado por los investigadores del Instituto de Ingeniería de Software de la Universidad Carnegie

Mellon (CMM en su primera versión); y como líder del proyecto, Watts Humphrey (Goksen, Cevik y Avunduk, 2015; Humphrey, 2002), para el Departamento de Defensa de los Estados Unidos, estaba preocupado por el cumplimiento de los contratistas. Posteriormente, este modelo ha sido utilizado por los contratistas en Estados Unidos, con positivos reportes de incremento de la productividad y la rentabilidad del negocio, que lo hicieron muy popular.

El objetivo del modelo de madurez se centra en evaluar la capacidad de los contratistas responsables de la ejecución de sus proyectos. Es una de las iniciativas de mejora de procesos más ampliamente adoptadas en la industria del *software* y más frecuentemente adaptada a otros sectores (Glazer, Dalton, Anderson, Konrad y Shrum, 2008). Una gran cantidad de los conceptos de mejora de procesos básicos presentes en el CMMI son genéricos y esto ha propiciado su aplicación, lo que lo hace potencialmente interesante para ser aplicable a la construcción.

El modelo cuenta con cinco niveles de madurez por los cuales el proceso debe pasar para mejorar de forma sostenible (Nesensohn, Bryde, Ochieng y Fearon, 2014; Paulk *et al.*, 1996). Estos niveles se muestran en la tabla 3.1. Para cada nivel, el CMMI cuenta con prácticas estandarizadas para identificar, a través de ellas, la madurez. Se identifican los niveles de madurez, y cada uno de ellos corresponde a la capacidad de los procesos.

En 1999 aparece el Mejoramiento de Procesos Estandarizados para Empresas de Construcción (SPICE, por sus siglas en inglés), un modelo de madurez desarrollado específicamente para la construcción que muestra muchas similitudes con el CMMI. Una de ellas está en la definición de cinco niveles de madurez. Para esta investigación, entre los expertos consultados hay consenso en que los niveles apropiados para un MM deben ser cinco. No se considera un nivel cero (0), este es solo el indicador de que no existe evidencia del proceso en evaluación. Los cinco niveles se consideran para este estudio de manera similar a los niveles del modelo SPICE, con modificaciones propias de la integración de LC en la GPC. Los cinco niveles para el modelo de madurez han sido definidos tomando como referencia a Sarshar *et al.* (2000), Siriwardena, Kagioglou, Jeong, Haigh y Amaratunga (2005) y Sun, Vidalakis y Oza (2009). Más recientemente, Nesensohn (2014) propone en su modelo cinco niveles de madurez que se relacionan en la tabla 3.1.

Tabla 3.1. Niveles de madurez definidos para cinco modelos de madurez

Nivel	Crosby 1979	CMMI 1996	SPICE 1999	LCMM 2014	SLC-EModel 2019
1	Incertidumbre	Inicial	Inicial / Caótico	Incierto	Inicial
2	Despertar	Repetible	Planeado y seguido	Despertar	Repetible
3	Ilustración	Definido	Comparte buenas prácticas	Sistemático	Sistemático
4	Sabiduría	Gestionado	Cuantitativamente controlado	Integrado	Gestionado
5	Certeza	Optimizado	Mejorado continuamente	Desafiante	Desafiado

Fuente: elaboración propia.

3.2.13 Identificación del estado de madurez de la Gestión de producción de proyectos de construcción antes de LC

La GPC en las organizaciones se desarrolla de diferentes maneras. Se integran tecnologías o estrategias de gestión para sus proyectos o sus procesos van desarrollándose de manera *ad hoc*. En cualquiera de las versiones, la organización cuenta con procesos, por medio de los cuales apoyan y avanzan en el desarrollo de la GPC y la producción misma. En este sentido, es conveniente diagnosticar el estado actual de la GPC antes de iniciar la implementación de LC para reconocer la distancia entre el estado actual de la GPC y lo que sería un primer nivel referido al MM. Para esta identificación, se usa el MM a fin de entender, con respecto del estándar, qué procesos de los que realiza la organización tienen características Lean, con los cuales se cuenta para iniciar un proceso de madurez de la GPC con la integración de LC. Esto es a lo que esta investigación denomina “un estado caótico”.

Las organizaciones llevan a cabo procesos que podrían ser enmarcados en conceptos Lean, sin que la misma organización se haya percatado de esta condición. También se integran

técnicas, herramientas y hasta algunos conceptos de LC que se han conocido e implementado en algunas áreas de trabajo. Una evaluación preliminar con la aplicación del MM reconoce los procesos que las organizaciones de construcción aplican en esa búsqueda de la eficiencia; sin embargo, es importante contar con una adecuada orientación para alcanzar un primer nivel de madurez.

Para iniciar una implementación, la capacidad del proceso es impredecible, se cambia o modifica constantemente a medida que avanza el trabajo, y tiene que ver con las aptitudes de los individuos hacia el apoyo de procesos institucionales. No obstante, el éxito del proceso está en cabeza de los líderes y si estos ya no están, el proceso se desordena, se vuelve caótico. En este nivel, el equipo del proyecto es “reactivo” a los cambios.

3.2.14 Niveles de madurez del SLC-MM

A continuación, se presentan los niveles de madurez definidos para esta investigación. Para cada uno de ellos se integran conceptos que direccionan su desarrollo.

- **Nivel 1 - Inicial**

Este es el nivel básico del modelo. Es muy importante, pues corresponde a la herramienta que conduce la implementación inicial de LC. En este nivel se integran los procesos, las prácticas y las herramientas a la GPC en cada una de las categorías, de acuerdo con el estándar definido para el proceso. Sin embargo, la atención se centra en la aplicación del estándar. Estos se conocen y se desarrollan en la medida en que se han aprendido, y lo que se busca es llegar a estabilizarlos.

Capacidad: La capacidad del proceso está enfocada en aplicar y estabilizar la implementación de LC en la GPC.

- **Nivel 2 - Repetible**

Se establecen protocolos y procedimientos sistemáticos para repetir los procesos. El proceso se controla y se documenta de acuerdo con los procedimientos establecidos previamente acordados. Un proceso bien definido incluye descripciones y modelos estándar para realizar el trabajo, mecanismos para verificar que el trabajo se ha realizado correctamente y criterios

de finalización, que proporcionan una buena visión del progreso. Los procesos para todas las actividades están documentados.

Capacidad: En este nivel se integran los estándares y se repiten. De igual manera, se integran prácticas exitosas de proyectos como estándares de trabajo.

- **Nivel 3 - Sistemático**

Los procesos se integran con otras funciones de la GPC, y se implementa un sistema de medición dedicado, de manera sistemática. El equipo del proyecto es solidario para gestionar los cambios. Se trata entonces de un sistema integrado y disciplinado. En este nivel se evalúa el estándar y se mejora. Se desarrolla la capacidad para capturar y compartir buenas prácticas en toda la GPC. Todos los proyectos utilizan una versión aprobada y adaptada del proceso estándar de la organización.

Capacidad: Establecer la disciplina para mantener el estándar, el cual se revisa y mejora constantemente. Se capturan y comparten buenas prácticas referenciadas.

- **Nivel 4 - Gestionado**

El nivel anterior permite el desarrollo de una disciplina para el trabajo. En este nivel se debe desarrollar un proceso de control objetivo del proceso. Se definen los estándares y se asegura que se sigan fielmente. Durante la ejecución del proyecto, las actividades son controladas, evaluadas y mejoradas. Un proceso efectivo puede describirse como uno que se practica, documenta, aplica, capacita, evalúa y puede mejorar. Se busca reducir la variabilidad en el rendimiento del proceso como parte de estrategias para medir la productividad y la calidad.

Capacidad: Realizar el control del proceso para reducir la variabilidad del mismo.

- **Nivel 5 - Desafiado**

El proceso se mejora continuamente para evitar cualquier repetición de fallas. Este nivel está enfocado en aprender y mejorar continuamente para identificar las debilidades y fortalecer los procesos de manera proactiva y colaborativa. Las innovaciones que se refieren a las mejores prácticas se identifican y transfieren en todo el proceso de la GPC. Una GPC nivel 5 es más flexible comparada con los niveles inferiores y permite adaptarse fácilmente a los cambios.

Capacidad: Gestionar constantemente el mejoramiento continuo. El nivel 5 no es el final, solo es el punto de partida para definir un “nuevo” nivel 5.

3.2.15 Calificación de la madurez de los atributos en el modelo

Cada atributo en el modelo se desarrolla para que contenga los cinco niveles de madurez, por medio de los cuales se alcanza sistemáticamente dicha madurez.

En el SLC-MM, los atributos del MM incluyen en los niveles de madurez procesos clave para cada una de las fases de desarrollo del proyecto. Estos procesos permiten identificar el nivel de madurez de los atributos. En este sentido, cada nivel de madurez de atributos contiene los requisitos para alcanzarlo, lo que incluye la descripción (la rúbrica), su alcance y los indicadores relacionados. Para que la GPC con LC alcance el nivel superior de madurez, todas las fases deben alcanzar el mismo nivel.

Como se ha explicado previamente, el desarrollo de los niveles de madurez de los atributos será objeto de una investigación posterior. Estos niveles deben integrar cuidadosamente cada uno de los procesos clave con el nivel de detalle suficiente para que la evaluación cuente con todos los elementos que reduzcan la subjetividad. Lo consignado en este aparte corresponde a lineamientos que deben ser integrados al desarrollo de la herramienta de evaluación de los atributos, en este modelo esta herramienta se denomina SLC-MAET, cuya utilidad se explicará más adelante.

Para la calificar los FM se requiere evaluar las características de madurez de los atributos con elementos cuantitativos a partir de evaluaciones cualitativas. Se establecen las rúbricas que especifican los estados de madurez del atributo. Se define en el texto el nivel de desempeño y se realiza la observación en campo para identificar el nivel obtenido de acuerdo con lo establecido en la rúbrica. Los valores de los indicadores no deberían estar asociados taxativamente a una escala numérica del 100 %, sino a una rúbrica con la cual se observa el sujeto de interés, en este caso el atributo, para identificar su nivel de madurez.

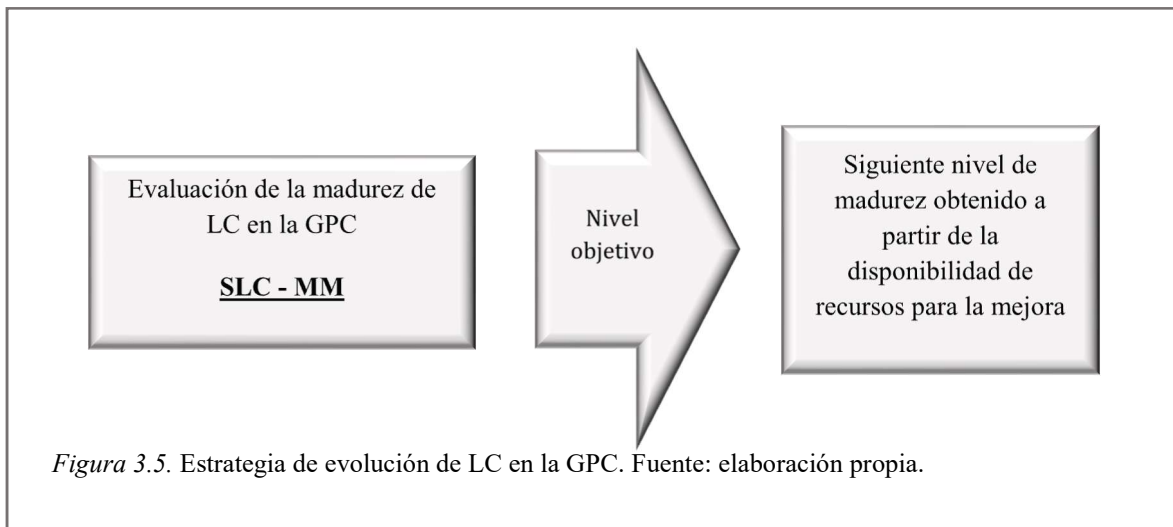
3.2.16 Evaluar el subnivel de madurez de los atributos

Hay un aspecto particular de la evaluación del atributo que permite reportar un subnivel del alcance de madurez. Este subnivel servirá para identificar el estado del alcance de la madurez del atributo cuando esta no se reporte en un nivel superior a pesar de alcanzar algunas de las características de dicho nivel. Se trata de *evaluación de la progresión del alcance de madurez del atributo*.

La evaluación del atributo se califica en un intervalo entre *inmaduro*, *casi maduro* y *maduro*. *Inmaduro* corresponde a un intervalo abierto entre 0 y 0,5, donde no están incluidos ni el 0 ni el 0,5; *casi maduro* corresponde a un intervalo cerrado a la izquierda donde está incluido el 0,5 pero no el 1 (0,5 - 1); y *maduro* corresponde a 1, o sea, el alcance del nivel en evaluación. Esta evaluación contiene un alto grado de subjetividad, sin embargo, es un indicador de avance del proceso y sirve a la evaluación para identificar cuánto le falta al atributo para alcanzar el nivel de madurez que se evalúa para ser completado.

3.2.17 Estrategia de evolución de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

De acuerdo con Crosby (1979), para realizar mejoras que lleven a evolucionar, basta fijarse en el siguiente nivel de madurez para identificar las medidas que deben acometerse para tal fin y formular la manera de llegar a ese punto. Es conveniente realizar transiciones suaves entre niveles y con una orientación que priorice este avance de acuerdo con las capacidades de la organización (figura 3.5). Estas prioridades están directamente relacionadas con los beneficios y los resultados que se pretenden alcanzar con la implementación de LC en la GPC. Entender cómo se contribuye a establecer metas a corto plazo para ir alcanzando progresivamente las metas del largo plazo, como se discutió en la sección 3.1.2.



3.2.18 Puntos clave de la sección

El Modelo de Madurez es una herramienta que puede ser integrada a diversos tipos de configuraciones del SPPC, esto dependiendo de la organización y su GPC. El proyecto es un organismo vivo que exige trabajar con cooperación y en el cual se desarrolla mucha interdependencia; por consiguiente, la cooperación y la colaboración son elementos centrales para el desarrollo del proyecto.

Los Modelos de Madurez proporcionan beneficios para avanzar hacia la madurez en Lean en la GPC. Esta investigación desarrolló un Modelo de Madurez de LC en la GPC, tomando como base el estado del conocimiento en la implementación de LC.

Los elementos presentados en la sección demuestran la importancia de investigar acerca de la manera en que la GPC madura con la integración de LC.

Capítulo 4

IDENTIFICACIÓN DE LA MADUREZ DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN

Resumen

El Modelo de Evolución de Lean Construction (SLC-EModel) apoya la selección de la estrategia más adecuada que permita a la organización incrementar el nivel de madurez en la Gestión de producción de proyectos de construcción (GPC), a partir del conocimiento de su estado actual de madurez. Dicho estado se identifica con la ayuda de un Modelo de Madurez (MM), el cual contiene el estándar con que se evalúa cada uno de los elementos, conformados como un sistema, involucrados en la madurez de LC en la GPC. La evaluación da lugar a la calificación de madurez, la cual se expresa por medio índices. El modelo de calificación desarrollado en esta investigación permite obtener índices locales y, a partir de ellos, un índice global de madurez; todos ellos explican la madurez del sistema como un todo.

En este capítulo se presenta la identificación de los elementos asociados con la madurez de LC en la GPC, la construcción del Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM), que es la herramienta con la que se identifican las relaciones entre los elementos del sistema y la identificación misma de las relaciones de madurez entre los elementos del sistema.

4.1 Identificación de los elementos asociados con la madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

Como se ha definido en esta investigación, la madurez es aquel estado de máximo desarrollo, o estado de excelencia, que ofrece la capacidad de volver realidad el objetivo proyectado con el más eficiente uso de los recursos disponibles. En este sentido, la organización dispone de mayor capacidad para manejar el ciclo de vida del proyecto de manera cada vez más eficiente haciendo uso de los recursos necesarios para tal fin. Desarrollar el modelo de evolución

requiere conocer con un alto nivel de certeza cuáles son los elementos involucrados en esa madurez y la manera en que ellos se encuentran relacionados. En esta sección se identifican los elementos que componen el Modelo de Evolución de LC en la GPC (SLC-EModel) a partir de una exhaustiva revisión de referencias académicas sobre diferentes iniciativas de evaluación de LC y de información primaria obtenida de expertos en LC consultados en el desarrollo de esta investigación. Los elementos identificados se agrupan en factores de madurez (FM), los cuales componen las categorías de madurez que conforman el SLC-EModel.

4.1.1. Identificación de los elementos de las categorías de madurez

Un estudio exploratorio inicial sobre barreras y factores críticos de éxito en la implementación de LC (Cano *et al.*, 2015; Mano *et al.*, 2018) dio como resultado una primera agrupación de estos en categorías y factores, de acuerdo con características comunes de los elementos estudiados. Esta primera agrupación en categorías mostró que podrían ser usadas para estructurar más adelante el modelo. Posteriormente, se adelantó una revisión de referencias académicas en las que se identificó un amplio número de elementos relacionados con la madurez, los cuales se contrastaron con los obtenidos en dos etapas de entrevistas a expertos. En primer lugar, los elementos identificados se agruparon alrededor de tres *categorías de madurez* –definidas en el trabajo anteriormente mencionado– como primer nivel jerárquico para el modelo. Para todas las categorías, estos elementos dieron lugar a 55 temáticas referidas por diversos autores. Más adelante, por medio de una validación por expertos se seleccionaron de estos 55, los 48 atributos de madurez para continuar con la investigación, ver Anexo 1.1, los cuales con ayuda de una herramienta de análisis estadístico multivariado se agrupan en los *factores de madurez*, la segunda jerarquía del modelo. A su vez, los elementos agrupados en cada factor de madurez dieron lugar al tercer nivel jerárquico del modelo, *los atributos de madurez*. Los 48 atributos fueron objeto de consulta a expertos con el fin de precisar, por medio de su importancia para la madurez de LC en la GPC, aquellos relevantes para el estudio. De esta forma se seleccionaron 35 atributos.

En entrevistas con expertos se obtuvieron 148 elementos y de la bibliografía, 277, para un total de 425 elementos relacionados en la madurez de LC. Estos elementos se agruparon en

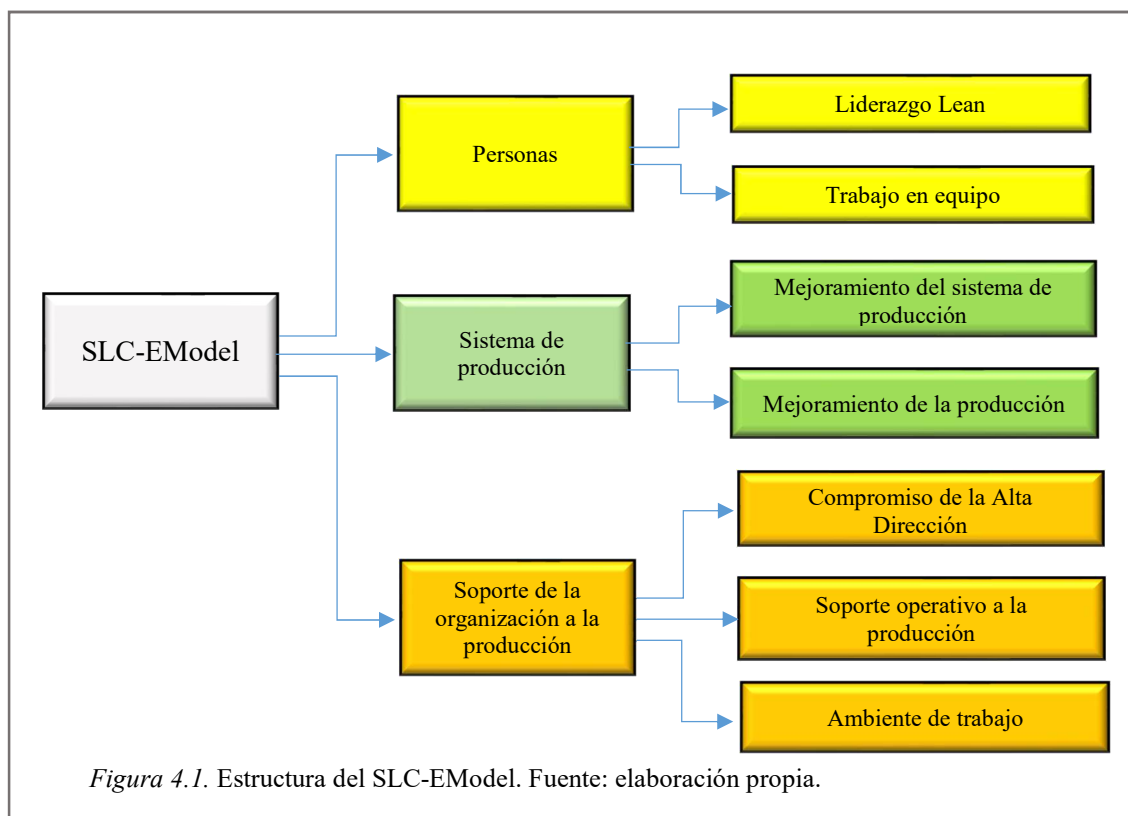
3 categorías, 7 FM y 35 atributos de madurez. Todos estos elementos más adelante son objeto del estudio de sus relaciones, influencia y dependencia con ayuda del Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM). A partir de este conocimiento se propuso la estructura del Modelo de Madurez (MM) y los índices de calificación local y global de esa madurez.

En este punto, en el desarrollo de la investigación se previó que un primer nivel de madurez del modelo debería conducir un proceso de implementación de LC en la GPC, lo cual es el punto de inicio de un proceso de evolución de la madurez.

Los elementos se agruparon en 3 categorías y 35 atributos, así:

- Personas: 133 elementos agrupados en 9 atributos.
- Sistema de Producción: 196 elementos agrupados en 13 atributos.
- Soporte de la organización: 116 elementos agrupados en 13 atributos.

Estos 35 atributos componen y explican los 7 factores de madurez del Modelo de Madurez (SLC-MM). La figura 4.1 muestra el esquema de los FM asociados a las categorías que se describen a continuación.



4.1.2 Categoría Personas

La categoría **Personas que soportan la producción de proyectos de construcción (PSP)** está conformada por los FM *Liderazgo Lean* y *Trabajo en Equipo*, y agrupan los atributos directamente relacionados con las actitudes, las aptitudes, las habilidades, las destrezas, la formación de las personas para LC en todos los niveles de la organización, la construcción de una cultura alrededor del crecimiento de LC, una cultura que promueva el trabajo en equipo, la solución de problemas, el aprendizaje continuo y la mejora continua. Esta categoría cuenta con 9 atributos que se presentan en la tabla 4.1. En las tablas 4.1, 4.2 y 4.3 se presenta la categoría, la denominación de cada FM y los atributos. A los FM se les asigna una variable Y_j , y a los atributos X_i . En esta notación Y identifica al factor y el subíndice j denota la cantidad de factores en el modelo, los atributos se denotan por X y el subíndice i corresponde a uno del total de atributos en el modelo. Esta notación será usada más adelante en la construcción del modelo para el análisis de relaciones entre los elementos de madurez. En la columna Identificación se muestra el código del atributo que se utiliza más adelante para la construcción del SEM y que está referido en el modelo haciendo uso del software WarpPLS.

Tabla 4.1. Categoría Personas: factores y atributos

Categoría	Factor	Atributo	X_i	Identificación
Personas que Soportan la Producción de Proyectos de Construcción	Liderazgo Lean Lean Leadership (LeaderSh)	Formación en la filosofía LC	X_{19}	LDC2
		Cultura Lean	X_{20}	A1
		Crecimiento y desarrollo de líderes Lean	X_{21}	LL1
		Valores y visión personal	X_{22}	A2
	Trabajo en Equipo TeamWork (TeamWork)	Promoción y desarrollo de Lean Construction	X_1	LL2
		Solución de problemas y aprendizaje continuo	X_2	PS2
		Procesos de trabajo en equipo	X_3	TW2
		Desarrollo de los equipos de trabajo	X_4	TW1
		Promoción de la mejora continua	X_5	LL3

Fuente: elaboración propia.

4.1.3 Categoría Sistema de Producción de Proyectos de Construcción

La categoría Sistema de Producción de Proyectos de Construcción (SPP) integra principalmente los principios LC agrupados en dos factores: uno enfocado en la mejora del sistema de producción, y otro en la mejora de la producción. Asociados a estos dos factores se presentan 13 atributos, 10 de los cuales corresponden directamente con los principios LC cuya aplicación impacta el sistema de producción; uno referente al cumplimiento de la oferta de valor; uno para el desarrollo de un sistema *pull*, y otro que corresponde al desarrollo de estándares (tabla 4.2).

Tabla 4.2. Categoría Sistema de Producción: factores y atributos

Categoría	Factor	Atributo	X _i	Identificación
Sistema de Producción de Proyectos de Construcción	Mejoramiento del sistema de producción System Production Improve (SPIImprov)	Flexibilidad	X ₂₃	PIM2
		Reducción del tiempo de ciclo	X ₂₄	WI4
		Reducción de la variabilidad	X ₂₅	WI3
		Control del proceso completo	X ₂₆	FC3
		Simplificación de procesos	X ₂₇	PIM1
		Transparencia	X ₂₈	PIM3
		<i>Benchmarking</i>	X ₂₉	PIM4
	Mejoramiento de la producción Production Improvement (ProImpr)	Desarrollo de estándares	X ₃₀	WPS1
		Conocimiento y selección de herramientas Lean Construction	X ₃₁	TU1
		Flujo continuo	X ₃₂	WI1
		Cumplimiento de la oferta de valor	X ₃₃	FC1
		Desarrollo de un sistema <i>pull</i>	X ₃₄	PPC2
		Mejoramiento continuo	X ₃₅	FC2

Fuente: elaboración propia.

4.1.4 Categoría Soporte de la Organización al Proceso de Producción de Proyectos de Construcción

La categoría **Soporte de la organización al proceso de producción de proyectos de construcción** considera tres factores: el compromiso de la Alta Dirección, el soporte operativo a la producción y el ambiente de trabajo. Corresponden a los procesos del corporativo que apoyan la producción. Son 13 atributos en 3 FM (tabla 4.3).

Tabla 4.3. Categoría Soporte de la Organización al Proceso de Producción de Proyectos de Construcción: factores y atributos

Categoría	Factor	Atributo	X _i	Identificación
Soporte de la Organización al Proceso de Producción de Proyectos de Construcción	Compromiso de la Alta Dirección Top Management Commitment (CommTM)	Definición y despliegue de la política y la estrategia para apoyar la construcción Lean	X ₉	HMC1
		Apoyo continuo para el desarrollo de un sistema de producción Lean Construction	X ₁₀	HMC2
		Enfoque en la filosofía	X ₁₁	HMC3
		Resultados del negocio	X ₁₂	IBP1
	Soporte Operativo a la Producción Operative Support for the Production (SupporOp)	Gestión del conocimiento	X ₁₃	INN2
		Operaciones logísticas	X ₁₄	SCLO2
		Proceso de gestión contractual	X ₁₅	IBP4
		Implementación de un sistema de gestión	X ₁₆	IBP3
		Sistemas de información	X ₁₇	CIF1
		Apoyo al proyecto con los procesos de organización	X ₁₈	IBP2
	Ambiente de Trabajo Work Environment (WorkEnv)	Participación de las personas en la construcción del ambiente de trabajo	X ₆	WE1
		Interacción en el entorno de trabajo	X ₇	WE2
		Aprendizaje y entrenamiento para la seguridad en el sitio de trabajo	X ₈	WS2

Fuente: elaboración propia.

En los factores de esta categoría se agrupan atributos relacionados con la filosofía, la estrategia para apoyar el desarrollo de LC, los resultados que impactan el proceso (con los cuales se toman decisiones), la información y la comunicación, la cadena de suministro, los

procesos de la organización al servicio del proceso de producción y la construcción del ambiente de trabajo en que se desenvuelven las personas.

En la siguiente sección se describe cómo se realizó la construcción del SEM a partir de la identificación de las categorías, los FM y los atributos.

4.2 Modelo de Ecuaciones Estructurales Aplicado a la Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

La selección del SEM para el desarrollo de la investigación obedece al entendimiento del tipo de información que se requiere para el estudio. Esta información corresponde a la identificación de las relaciones entre los elementos responsables de la madurez que habían sido seleccionados previamente. Se consideró el uso de Dinámica de Sistemas, sin embargo, esta herramienta exige el conocimiento de las relaciones y es precisamente lo que se requiere identificar. También se consideró realizar análisis con el método para toma de decisiones como el Analytic Hierarchy Process (AHP) para tomar decisiones respecto de que elementos se encuentran relacionados, sin embargo, ninguna de estas metodologías ofreció condiciones favorables para ser usada en la investigación. De esta manera, la experiencia investigativa de uno de los directores de investigación orientó el uso de SEM, con lo cual se diseñó el instrumento de recolección de información para ser aplicado y la información recolectada usada en la investigación al usar el SEM con los datos obtenidos.

La madurez es una condición que no es fácil de observar directamente, por lo que requiere ser explicada a partir de otros elementos articulados como un sistema. La madurez es entonces un constructo que requiere de variables que miden directamente las características de interés. Estos constructos se denominan variables no observables o latentes y requieren de variables observadas para explicar dichos constructos, con los cuales se proponen hipótesis que se prueban con ayuda de una herramienta diseñada para tal fin: un Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM) (Cupani, 2012) (García et al, 2011) (Chandra, 2015). Las hipótesis planteadas por investigadores y expertos sobre la evaluación de la madurez se plasman en el SEM propuesto, el cual es puesto a prueba y evaluado en su nivel de ajuste, de esta manera se identifica en qué medida el fenómeno estudiado se comporta. El SEM permite realizar un

análisis exploratorio y otro confirmatorio del modelo.

Con los elementos clasificados en categorías, FM y atributos, se construye el SEM, con el cual se revelan las relaciones entre los elementos. El SEM permite validar las relaciones, entre las variables latentes. La madurez de cada FM permite construir un índice para cada uno de ellos, que se ha denominado índice de madurez local (IML), y con todos los índices locales se construye el índice global de madurez (IGM) que corresponde a la madurez de LC en la GPC. La información para la construcción del SEM se obtuvo de una encuesta aplicada a 111 expertos en 19 países.

4.2.1 Métodos para analizar la información obtenida para el estudio de las relaciones entre elementos de madurez de LC en la GPC

El SEM es una técnica que hace uso de la regresión múltiple y el análisis factorial con los cuales permite la evaluación de interrelaciones de dependencia complejas. (Cupani, 2010). Para la evaluación de la madurez de LC en la GPC, en esta investigación se utilizaron métodos estadísticos como el Análisis de Componentes Principales, Análisis Factorial, regresión múltiple, Path Analysis, los cuales permiten distinguir y operar variables observadas y variables no observables o latentes conformadas a partir de los elementos responsables de la madurez identificados en la sección anterior. Las variables latentes no pueden ser medidas directamente, se miden por medio de las variables observadas, representan conceptos unidimensionales, constructos, y están alineadas con la teoría del tema de interés. De otra parte, las variables manifiestas u observadas se miden directamente de un experimento diseñado para obtener la información de interés. Para su uso en esta investigación, las variables latentes se denominan factores de madurez (FM) y las variables observadas, atributos.

Es un método para analizar la información requerida para la evaluación de la madurez de LC en la GPC, además de distinguir y operar variables latentes y variables observadas, calcular el valor de las variables latentes, evaluar relaciones de dependencia múltiple y cruzada entre variables, evaluar la importancia relativa de cada predictor, probar hipótesis referentes al nivel de ajuste del modelo propuesto y evaluar la significación de las relaciones entre las

variables. Para este propósito existen varias técnicas estadísticas que cumplen con las características mencionadas anteriormente, entre ellas se cuentan: regresión múltiple, análisis de discriminante, análisis de varianza, regresión logística, análisis factorial y análisis de clústeres.

Investigadores como Haenlein y Kaplan (2004) explican las limitaciones de estos métodos, entre otras, que todas las variables deben ser observadas y sus mediciones obtenidas a través de un experimento, que deben ser medidas sin error y que se trata de un modelo estructural simple. Los estudios requieren de análisis de muchas variables, así que considerar la relación entre una o dos variables no es una situación del mundo real. Finalmente, cualquier medición en el mundo real contiene un error, ya sea aleatorio o sistemático, debido al método de medida.

El Modelo de Ecuaciones Estructurales, por su parte, corresponde a un método que cumple con las características requeridas para la evaluar un fenómeno como la madurez. Estos modelos utilizan elementos técnicos como análisis de senderos, análisis factorial y regresión múltiple o componentes principales. Cuentan con un modelo de medida y un modelo estructural que los hacen más robustos que la utilización por separado de las técnicas presentadas. Una de las características más relevantes de los SEM es la identificación del modelo, que especifica relaciones entre variables. La identificación del modelo requiere de varias características: aceptación teórica del modelo, eliminación de modelos equivalentes, indicadores aceptables del modelo y replicación de los resultados con muestras independientes. De esta manera, la evaluación de madurez se puede realizar a través de un SEM desarrollado explícitamente para ello. En el Anexo 4.1 se presenta en detalle el contexto teórico relacionado con el SEM articulado con el desarrollo de esta investigación.

Los principales enfoques para la evaluación de modelos estructurales son: el enfoque de varianza y el enfoque de covarianzas. En el desarrollo de este trabajo se utilizó el enfoque de covarianzas, debido a que permite usarse para confirmaciones teóricas de relaciones con un número reducido de variables y observaciones. Más adelante se presentan los resultados y el análisis de la evaluación para el cual se consideró este enfoque de covarianzas y la utilización del *software* WarpPLS, cuya licencia está a cargo de la Universidad Autónoma de Juárez y que fue dispuesta para esta tesis. Se realiza el análisis estadístico para el Modelo de Medida

y el Modelo Estructural, se presentan los resultados obtenidos, así como el esquema de ponderación utilizado en el modelo interno o estructural.

4.2.2 Modelos de Ecuaciones Estructurales

Para realizar el estudio de fenómenos complejos, como algunos fenómenos sociales, psicológicos y, en particular, el fenómeno de la madurez, tema central de esta investigación, se utilizan métodos multivariados. Corrientemente, para abordar este tipo de análisis, se usan técnicas de regresión múltiple, el análisis factorial, el análisis multivariante de la varianza y el análisis discriminante. Sin embargo, su limitación está en que solo pueden examinar una relación al tiempo, incluso el análisis multivariante de la varianza, el cual solo representa una relación entre variables dependientes e independientes (Cupani, 2012; Hair, Anderson, Tatham y Black, 1999). Estas limitaciones plantean la necesidad de utilizar técnicas de mayor nivel que superen las limitaciones de las técnicas mencionadas, como los SEM.

Los SEM han sido utilizados sobre todo en el campo de las ciencias sociales en la evaluación de variables no observables a partir de variables observables; además, permiten identificar y analizar relaciones entre estas variables no observables. Son una familia de modelos estadísticos multivariantes que pueden ser utilizados para estimar el efecto y las relaciones entre múltiples variables. Es una combinación de algunas técnicas multivariadas como la regresión múltiple, el análisis de caminos, o *path analysis*, y el análisis factorial (Kahn, 2006). Permiten estudiar simultáneamente relaciones de dependencia entre variables dependientes e independientes, siendo muy importantes las relaciones en las cuales una variable dependiente se convierte en independiente. Otro análisis que facilitan los SEM es la identificación de los efectos distintos de las mismas variables en cada una de las variables dependientes (Hair *et al.*, 1999).

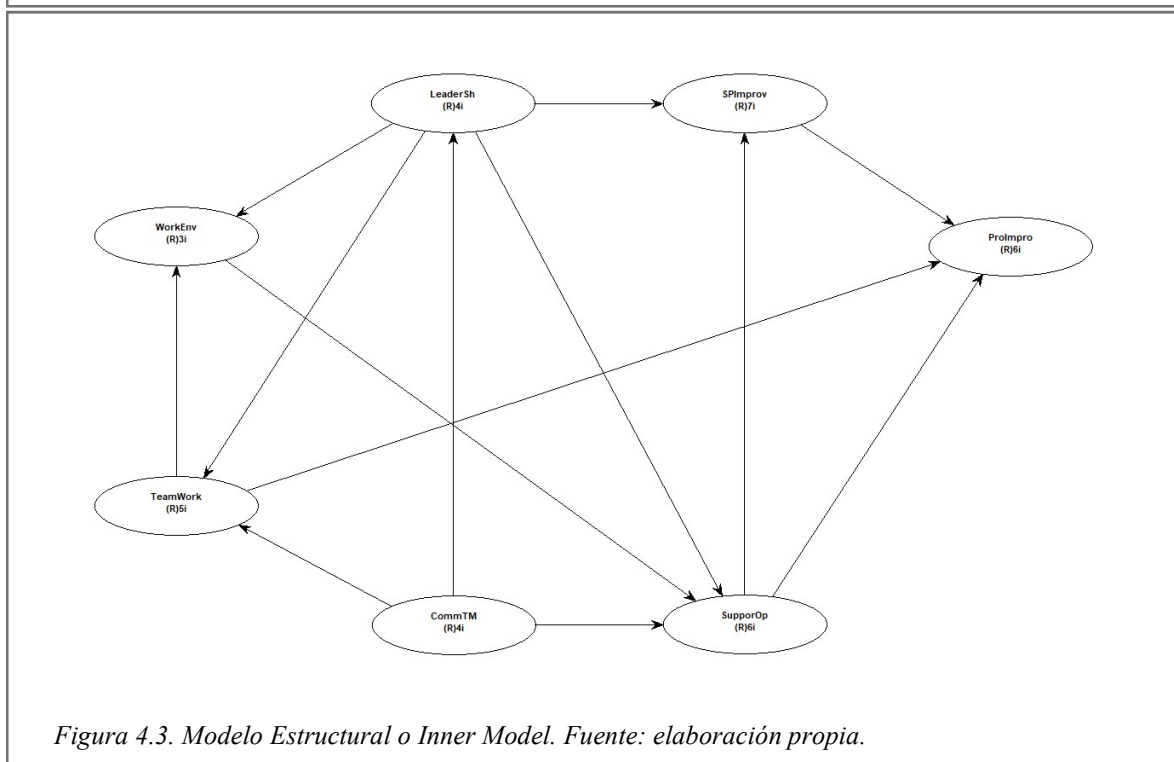
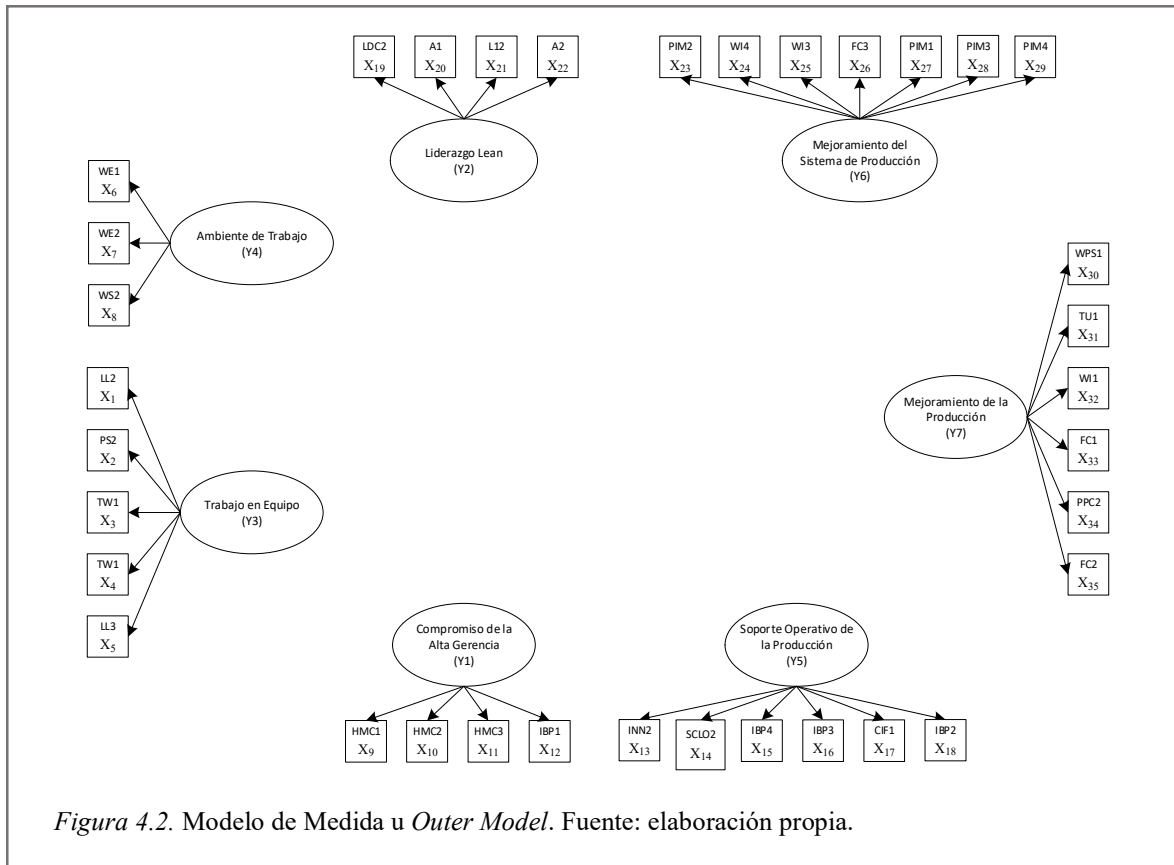
Los SEM dan más flexibilidad a los modelos de regresión. Combinan la regresión múltiple y el análisis factorial con cuya información resultante se pueden evaluar interrelaciones de dependencia, además de considerar los efectos del error de medida sobre los coeficientes estructurales al mismo tiempo (Cupani, 2012). Matemáticamente, estos modelos son más complejos de estimar que otros modelos multivariantes como los de regresión o análisis factorial exploratorio, es algo así como resolver varios modelos de análisis factorial al mismo

tiempo. Los SEM tienen la capacidad de estimar y evaluar la relación entre las variables latentes, así como la validez de cada una de ellas. Se puede utilizar una variedad de medidas para representar el constructo y controlar el error de medición específico de cada variable, a diferencia de otras técnicas de análisis en las cuales los constructos pueden ser representados con un único resultado y no se puede modelar el error relacionado con la medición.

En la construcción del SEM se propone el tipo y dirección de las relaciones que se esperan encontrar entre variables en el modelo. Así, luego de proponer el modelo, se estiman los parámetros de las relaciones propuestas a nivel teórico. Un SEM puede ser utilizado como modelo confirmatorio si, a partir de la teoría, se busca comprobar las relaciones usadas como base del modelo; o exploratorio, si lo que se busca es identificar precisamente las relaciones entre las variables según la información contenida en ellas. Estos modelos no prueban la causalidad, solo ayudan a seleccionar hipótesis causales relevantes apoyadas en los datos, de tal manera que de las relaciones que se proponen, se seleccionan aquellas que representan los datos recolectados para el experimento (Weston y Gore, 2006).

El SEM está compuesto por dos submodelos: el de medida y el estructural.

- **El modelo de medida** o modelo externo (*Outer Model*) establece la relación entre los FM y sus indicadores, que son los atributos, y obedece las reglas del análisis de factores. La figura 4.2 corresponde al modelo de medida de la investigación identificado con los atributos asociados a los FM. El objetivo del modelo de medida es confirmar qué tan correlacionados están los atributos para explicar o identificar los FM. Si estos atributos cuentan con altos valores de correlación, indica que el investigador ha acertado en las relaciones entre las variables (Weston y Gore, 2006).
- **El modelo estructural** o modelo interno (*Inner Model*) relaciona los FM. Describe las relaciones entre ellos, se hace uso de técnicas multivariantes como la regresión múltiple, el análisis factorial y el análisis de senderos. Uno de los supuestos fundamentales del SEM es que las variables dependientes tienen cierta variación no explicada por la variable latente que es atribuible al error de medición (Cupani, 2012), y la varianza del error debe ser modelada. En la figura 4.3 se presenta el modelo estructural desarrollado para esta investigación.



4.2.3 El proceso de construcción del Modelo de Ecuaciones Estructurales

El Modelo de Ecuaciones Estructurales permite resolver dos problemas: (a) revelar las relaciones entre todos los elementos categorizados para identificar las interacciones entre ellos, y (b) entender la función de cada uno de los elementos en el proceso de madurez, con el fin de conducir el desarrollo del modelo de evolución que es el interés de la tesis.

Existen tres estrategias para el desarrollo del SEM:

- **Modelización confirmatoria:** Se especifica el modelo aislado y se utiliza el SEM para evaluar, por medio de los resultados estadísticos, su desempeño o ajuste. Este modelo probablemente es uno de muchos posibles modelos que pueden ser propuestos y no necesariamente es el “mejor”, lo que se denomina un sesgo confirmatorio.
- **Modelos rivales:** Permite evaluar el modelo propuesto con relación a diferentes modelos alternativos, e identificar el modelo que permita el mejor nivel de ajuste y, por tanto, seleccionar el “mejor” modelo.
- **Desarrollo del modelo:** Con un modelo propuesto, se busca mejorarlo sistemáticamente al modificar el modelo de medida o el estructural. Aquí se proponen modelos diferentes para encontrar uno nuevo.

Esta investigación utilizó la estrategia del *Desarrollo del modelo*. El modelo propuesto fue especificado con un arreglo de atributos que se agrupan y explican alrededor de los FM. Con ayuda del análisis factorial se confirmó que la ubicación de los atributos en cada uno de los FM fuera consistente con su aporte de variabilidad a cada uno de ellos. Se propusieron las relaciones a probar entre los FM, las cuales se fueron cambiando mediante diferentes configuraciones de relaciones hasta encontrar la que, a juicio de la investigadora, representaba el mejor ajuste para el estudio.

4.2.3.1 Recolección de información

La recolección de información se llevó a cabo por medio de la Encuesta de Importancia de Atributos en la Madurez de LC en la GPC (EMA); en la encuesta, cada pregunta corresponde a un atributo de madurez. Es importante notar que un instrumento de medida como la encuesta propuesta para la recolección de información, debe sustentar relevancia, congruencia, suficiencia y claridad. Adicionalmente, la información recolectada debe ser

objeto de una validación racional y una validación estadística. Los métodos de recolección de información están explicados en el Anexo 1.1.

En la aplicación de la EMA se solicita la participación de 256 expertos en LC en varios países del mundo: investigadores, practicantes y profesores, de los cuales 111 respondieron. Para la identificación de estos expertos, se hizo uso de las referencias utilizadas en esta investigación, obtenidas en el proceso de revisión de bibliografía. Con base en esas referencias se fueron incluyendo otros expertos que aparecen como coautores en las investigaciones referenciadas. También se hizo uso de la red de profesionales LinkedIn para encontrar contactos de otros expertos en LC como parte del círculo profesional de expertos en esa red.

La EMA incluyó preguntas referentes a la importancia del atributo para la madurez de LC⁵, cuyas respuestas se evaluaron en una escala de Likert (1932) de 1 a 5, donde 1 correspondía a *el atributo no es importante en la madurez de LC en la GPC*; 2, *el atributo es ligeramente importante en la madurez de LC en la GPC*; 3, *el atributo es importante en la madurez de LC en la GPC*; 4, *el atributo es muy importante en la madurez de LC en la GPC*; y 5, *el atributo es extremadamente importante en la madurez de LC en la GPC*.

4.2.3.2 Validación racional

Para seleccionar los atributos que conforman la EMA usada para esta validación racional, se aplicó el índice de Aiken a un grupo de 55 atributos inicialmente identificados (Aiken, 1980; 1985), con lo cual se pudieron confirmar 48 atributos para conformar la EMA a expertos. De acuerdo con la recomendación del método del índice de Aiken, se requiere un mínimo de ocho expertos, los cuales se integraron a la investigación, cuatro de ellos en Colombia y cuatro en Santiago de Chile.

Para consultar a estos ocho expertos, se desarrolló una encuesta específica que fue aplicada personalmente. Para la encuesta se definió una escala de 1 a 10. Los dos conceptos extremos en esta escala corresponden a: 1, *el atributo no es importante para estudiar la madurez de LC en la GPC*, y 10, *el atributo es extremadamente importante para estudiar la madurez de LC en la GPC*. Por parte de los expertos no fue sugerido ningún atributo adicional. Se tuvo

⁵ Los atributos referidos a las categorías en las que se agrupan fueron presentados en la sección 4.1.

en consideración que si en la aplicación de la encuesta, alguno de los atributos fuese calificado en el nivel 1 por al menos el 51 % de los expertos, se eliminaría del estudio.

4.2.3.3 Validación estadística de la información recolectada en la encuesta

En este punto se verificó la validez estadística de la información obtenida para las 48 variables en la EMA; esto se llevó a cabo con el cálculo del índice alfa de Cronbach (Cronbach, 1951), que permite medir la fiabilidad de la escala de medida para la madurez, la magnitud no observable directamente –la cual es construida a partir de las variables observadas– y los atributos –los cuales deben mostrar mediciones estables y consistentes con un elevado nivel de correlación entre ellos– (Cronbach, 1951).

En la medida en que el valor obtenido para el alfa de Cronbach se aproxime a 1,0, mayor será la fiabilidad de la escala. En este caso, en las respuestas de la EMA para los atributos, se obtuvo un valor para el alfa de Cronbach 0,960 (índice calculado con ayuda del *software* SPSS18 licenciado para la Universidad del Valle). El criterio de aceptación considera que valores del alfa de Cronbach superiores a 0,7 son suficientes para garantizar la fiabilidad de la escala. Con el valor obtenido de 0,960 se confirma la fiabilidad de la escala y se verifica que la selección de expertos ha sido apropiada de acuerdo con Cronbach (1951).

4.2.3.4 Valores perdidos y valores fuera del rango

La matriz de datos obtenidos para este estudio no presenta datos perdidos o *Missing Data*, ni valores fuera del rango de calificación. Esto se debe a que la EMA, al ser realizada por medio de la aplicación Google Forms, permitió seleccionar, en su diseño, una instrucción que exige responder todas las preguntas. De igual manera, no hay valores fuera del rango de evaluación debido a que los expertos seleccionaron su calificación de una serie de opciones restringida y no hubo espacio para otro tipo de calificación.

4.2.3.5 Selección de atributos para conformar los factores de madurez

Con las respuestas de la EMA se realizó un análisis de componentes principales (PCA) con los 48 atributos, para buscar una forma eficiente de agrupamiento que diera origen a diferentes conceptos referenciados por expertos en LC, o que estuviesen documentados en la literatura académica. Una condición que exige el uso de PCA, es que las variables tienen que

distribuirse normalmente, por lo cual, los datos se transforman utilizando el método del logaritmo para cada una de las columnas de los atributos. Los datos también se estandarizan. No se requiere realizar tratamiento de datos para eliminar valores fuera de rango, ni reemplazo de valores faltantes.

La técnica de PCA ayuda a reducir la cantidad de atributos al agruparlas en lo que se ha denominado en esta investigación los FM. Sin embargo, al aplicar PCA a los 48 atributos sin considerar su agrupación en categorías, el resultado de esta primera forma de agrupamiento no promovía conceptos LC como se esperaba. Esta situación condujo a aplicar el PCA para los atributos agrupados en cada una de las tres categorías de madurez. Esta decisión estuvo fundamentada en el trabajo previamente realizado de agrupación, según las categorías propuestas en Cano *et al.* (2015), y en la búsqueda de conceptos LC a partir de los constructos resultantes. Estos atributos se presentan en las tablas 4.1, 4.2 y 4.3.

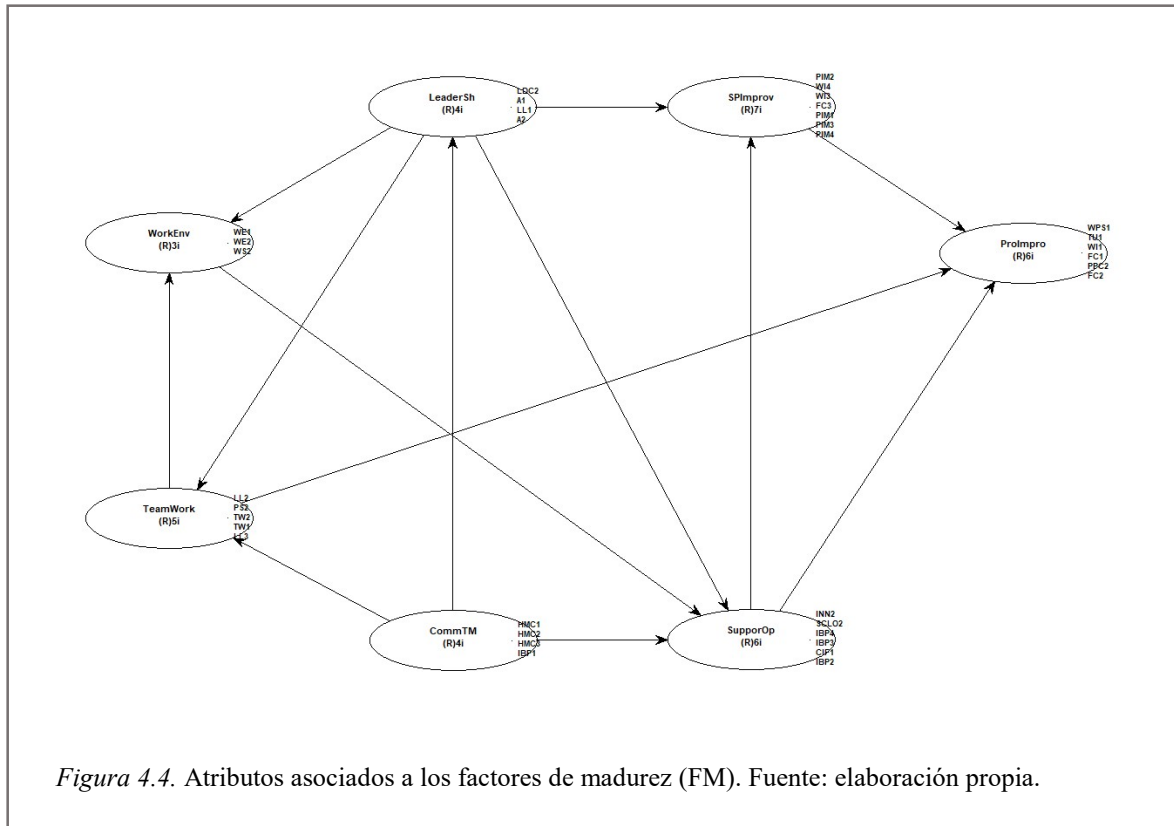
Al aplicar PCA a los atributos en cada una de las categorías, los FM resultantes sí ofrecen la representación de conceptos conocidos y documentados en LC. Los atributos que identifican los FM están altamente correlacionados. Los atributos de manera individual explican un comportamiento particular, sin embargo, al estar reunidos en los FM explican un comportamiento de mayor nivel. En este sentido, cuando un atributo contiene la misma información que otro, uno de ellos es eliminado del conjunto por explicar el mismo comportamiento. De esta manera y con la aplicación de este criterio, se eliminaron 13 de los 48 atributos cuestionados en la EMA, quedando 35 agrupados en siete FM. Un modelo construido de esta forma busca ser más simple y contener la información precisa que se requiere. El objetivo de la utilización de PCA es la construcción del modelo para esta investigación con un número preciso de FM.

En este punto es importante explicar que se puede construir el SEM sin realizar previamente un PCA por medio de la agrupación de atributos que efectúa el *software* WarpPLS, el cual hace esta agrupación por medio de un análisis factorial (AF). El uso del PCA fue específico para esta investigación, pues permitió un ahorro significativo de tiempo para identificar los mejores arreglos para la construcción de los FM, ya que, al agrupar las variables observadas según el contenido de variabilidad de los atributos correlacionados, fue más precisa la conformación de estos constructos. El AF se concentró en el modelo de medida, y con esta

información se pudo ir ajustando la selección de atributos asignados a los FM según sus cargas factoriales. Los conceptos bajo los cuales se agruparon los atributos representan de manera muy precisa los conceptos estudiados en la teoría, estos son:

- Compromiso de la Alta Dirección
- Soporte Operativo a la Producción
- Ambiente de Trabajo
- Liderazgo Lean
- Trabajo en Equipo
- Mejoramiento del Sistema de Producción
- Mejoramiento de la Producción

En la conformación de los FM, el criterio de agrupación de los atributos corresponde con que valores propios sean superiores o iguales a 1,0. El valor propio indica los FM que pueden ser obtenidos a partir de los atributos estudiados. Para la conformación de cada FM se verifica que el aporte de variabilidad del grupo de atributos en el FM sea superior a 0,5. Esto es, para un $R^2 = 0,5$, el valor de variabilidad R de 0,7 se considera un valor con alto contenido de variabilidad, de esta forma, el criterio de inclusión de los atributos es superior o igual a 0,7 de varianza (García, 2011). En la figura 4.4 se muestra la configuración del modelo con los atributos que explican cada FM.



4.2.4 Construcción del Modelo de Ecuaciones Estructurales

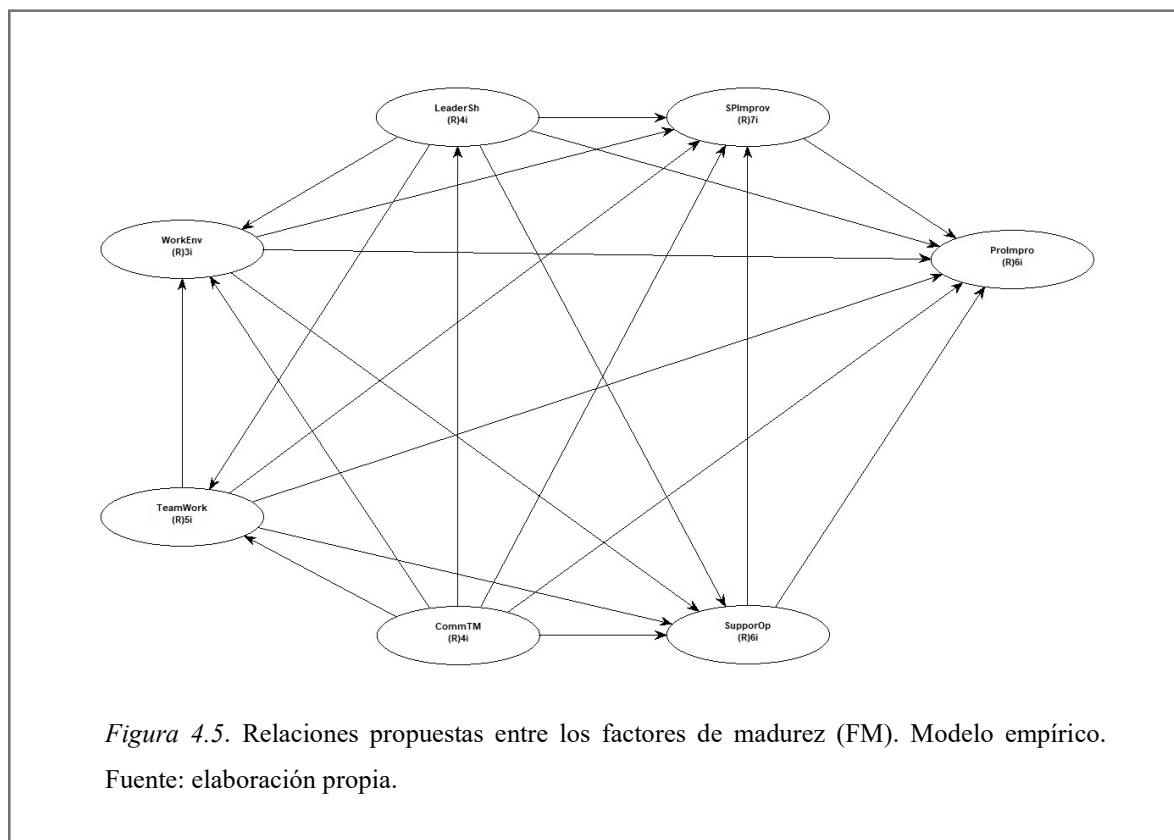
De acuerdo con Cupani (2012), los expertos en SEM consideran seis pasos que se deben seguir para aplicar esta técnica:

1. Especificación del modelo
2. Estimación de parámetros
3. Identificación del modelo
4. Evaluación del ajuste
5. Re-especificación del modelo
6. Interpretación de resultados (Kaplan, 2000)(Kline, 2011)

En la siguiente sección se detallan los aspectos relacionados con la construcción del SEM, análisis y validación de la información contenida en él.

4.2.4.1 Especificación del modelo

En primer lugar, se propone un modelo empírico para el SEM, en el cual se establecen todas las relaciones posibles de los FM (figura 4.5), con base en la experiencia de la investigadora y en la interacción con los expertos. Este modelo, de acuerdo con el método de SEM, debe ser recursivo, lo que implica una dirección de las influencias, sin que se presenten efectos retroactivos o bucles entre los FM.



Este modelo se compone de los FM y los atributos asociados a ellos, los cuales explican cada uno de los FM. Es importante definir el tamaño de muestra adecuada para aplicar la EMA, la cual, de acuerdo con Kline (2011), debe tener entre 10 y 20 participantes por parámetro observado. Para el SEM, los parámetros observados son 35, lo que exige un mínimo de 350 encuestas contestadas; sin embargo, la forma en que se estructuró el modelo permite una menor selección de parámetros, considerando el FM que cuenta con el mayor número de relaciones debidas a los atributos que lo explican y los efectos que reciben del FM.

Para realizar el AF, en este modelo, según la recomendación de Kline (2011), se requiere obtener un mínimo de 120 encuestas contestadas para contar con una fuente de información confiable. En esta investigación se consideró un mínimo de 10 participantes por parámetro, así que, con 12 parámetros de la variable con más relaciones se necesitaron 120 respuestas. La estimación del número de encuestas requeridas se explica a continuación.

Con los atributos agrupados en cada uno de los FM, y las relaciones propuestas entre FM, se identificaron los FM con mayor cantidad de interacciones, tanto los atributos asociados a los AF como de los efectos recibidos de otros FM. Esto dio como resultado los FM Mejoramiento del Sistema de Producción (SPImprov) y Mejoramiento de la Producción (ProImpr) con 12 relaciones cada uno.

En las figuras 4.4 y 4.5 se identifican las relaciones para estos FM: SPImprov cuenta con 7 relaciones que corresponden a los atributos que lo explican y 5 efectos de los FM Liderazgo Lean, Soporte Operativo, Compromiso de la Alta Dirección, Trabajo en Equipo y Ambiente de Trabajo, no se considera el efecto de este FM en otros. ProImpr cuenta con 6 atributos que lo explican y 6 efectos de los FM Liderazgo Lean, Soporte Operativo, Compromiso de la Alta Dirección, Trabajo en Equipo, Ambiente de Trabajo y Mejoramiento del Sistema de Producción.

Se recibieron 111 respuestas, 7,5 % por debajo de las requeridas según Kline (2011); sin embargo, se decidió avanzar en la consolidación de la estructura del modelo con estas respuestas. Esta decisión guarda particular importancia pues, a pesar de que no se contaba con el número mínimo recomendado de encuestas respondidas, con ayuda del *software* para la aplicación del SEM, se descartaron relaciones no significativas. Una vez se confirmaron cuáles de las relaciones previstas en el SEM eran significativas, se verificó que se requerían 90 respuestas para el análisis de la información. Así, el FM con más parámetros a estimar fue el Mejoramiento del Sistema de Producción. Este FM cuenta con 9 relaciones: los 7 atributos que lo explican y 2 relaciones efectos de los FM, Liderazgo Lean y Soporte Operativo. De esta manera, las 111 respuestas fueron suficientes para adelantar el estudio, las 21 respuestas adicionales a las 90 requeridas, representan el 23 % por encima del mínimo requerido.

4.2.4.2 Creación del Modelo en Ecuaciones Estructurales (SEM)

Una vez identificados los FM, se precisó la estructura del SEM, se corrió el programa y se confirmó la correlación entre los atributos de cada FM con ayuda del AF. El criterio de agrupamiento confirmó que los atributos se integran al FM con valores de varianza por encima de 0,6 (por debajo de 0,5 indica que los atributos explican de manera inadecuada al FM). Las cargas factoriales (CF) altas de los FM corresponden con una matriz de estructura (es decir, no girada); mientras que las cargas cruzadas son bajas y corresponden a una matriz de patrón (es decir, girada).

En la creación del SEM puede darse una situación en la cual algún atributo, a pesar de estar bien correlacionado en el FM, se ubica mejor en otro FM aunque no ofrezca una CF alta. En el modelo, por ejemplo, se dio esta situación: el atributo IBP1 mostró una CF de 0,616 en el FM Compromiso de la Alta Dirección; sin embargo, el AF mostró que estaría mejor ubicada en el Mejoramiento del Sistema de Producción con CF de 0,659. Entonces se probó cambiarla de lugar y el modelo desmejoró su ajuste. Este atributo regresó al FM original donde contribuyó a un mejor ajuste del SEM. El atributo mostró más adherencia a las decisiones que toma la Alta Dirección que al Mejoramiento del Sistema de Producción, respectivamente. Las CF de cada atributo agrupado en cada FM se presentan en el Anexo 4.2.

4.2.4.3 Estimación de parámetros del modelo

Los parámetros para estimar el modelo corresponden a las CF de los atributos para cada uno de los FM con los que están relacionados, a los valores de los β entre los FM y a los errores asociados con los atributos y a los FM. Entonces, el número de parámetros a estimar es la sumatoria de:

- Cantidad de parámetros para atributos: 35
- Cantidad de parámetros para los factores de madurez: 7
- Los valores de β entre factores de madurez: 13
- Errores para los atributos: 35
- Errores para los factores de madurez: 7
- Número de parámetros a estimar (NPE): $35 + 7 + 13 + 35 + 7 = 97$

4.2.4.4 Identificación del modelo

Si el modelo teórico está relacionado conforme con el fenómeno que se desea estudiar a juicio del investigador, se procede a su identificación con el fin de asegurar que se pueden estimar los parámetros del modelo. Un modelo está identificado si todos los parámetros lo están, es decir, si hay una solución para cada uno de los parámetros.

Un modelo es *identificado* si cuenta con cero grados de libertad (GL), lo que corresponde a un ajuste perfecto del modelo. Esta solución no tiene interés, puesto que no se pueden generalizar los resultados del estudio.

Un modelo es *sobreidentificado* si consta de más información en la matriz de datos que el número de parámetros a estimar, corresponde a un valor positivo de grados de libertad. Este es el ideal de todos los SEM, dado que se puede disponer de más información que parámetros a resolver y obtener el mayor número de grados de libertad posible. Al igual que otras técnicas multivariantes, el investigador se esfuerza por conseguir un ajuste aceptable con el mayor grado de libertad posible. Esto garantiza que el modelo sea fácilmente generalizado.

Un modelo *subestimado* tiene grados de libertad en negativo. Se busca estimar más parámetros de los que se pueden con la información disponible. Para la identificación del modelo de esta investigación, se calculan los grados de libertad con la siguiente fórmula:

NVO: Número de variables observadas: 35

NPE: Número de parámetros a estimar: 97

$$GL = (NVO \times (NVO + 1)) / 2 - NPE = (35 \times (35 + 1)) / 2 - 97 = 533$$

- **Resultado de la identificación del modelo**

El modelo cuenta con 533 grados de libertad. Este resultado muestra un modelo sobreidentificado, lo que significa que existe más información que parámetros a estimar (son 97 parámetros a estimar) y, en consecuencia, el modelo puede ser estimado y contrastado.

- **Consideraciones del resultado de la identificación del modelo**

Un modelo con más grados de libertad es parsimonioso, esto quiere decir que se ajusta bien a los datos, de esta manera el investigador puede demostrar que las asociaciones entre

atributos y FM son importantes. El modelo SEM para esta investigación es un modelo parsimonioso.

- ***Validez de la información para los factores de madurez***

Es importante verificar la validez de las variables del modelo para posteriormente interpretarlo. No es conveniente interpretar el modelo hasta que no se verifique su validez. Primero se debe asegurar que las variables sean válidas y así confirmar que el modelo es válido. En este caso, el análisis de la validez de los atributos se llevó a cabo con base en la tabla 4.4. Estos índices se validaron de acuerdo con la interpretación detallada en el Anexo 4.3 para la validez de los FM del SEM. Los elementos de referencia para verificar el ajuste de los FM de la tabla 4.4 se presentan a continuación:

R-Squared	$\geq 20 \%$
Cronbach's Alpha	$\geq 0,7$, el criterio relajado es para Composite reliability $\geq 0,8$
AVE	$\geq 0,5$
VIF	$\leq 3,3$
Q-squared	$> 0,0$
Skewness	$\leq 3,0$
Kurtosis	$\leq 5,0$, un criterio más relajado es ≤ 10

En la tabla 4.4 se verifica que todos los indicadores presentados demuestran la validez de la información de los FM. Donde ninguno de los indicadores sobrepasa los rangos de aceptación de la validez de los FM.

Tabla 4.4. Estadísticos del SEM. *Software* WarpPLS 6.0. Coeficientes de los factores de madurez

Estadístico	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
R-Squared	0,539	0,469		0,890	0,311	0,522	0,706
Adj. R-Squared	0,530	0,459		0,887	0,305	0,513	0,698
Composite realib.	0,862	0,774	0,838	0,888	0,814	0,903	0,871
Cronbach's alpha	0,799	0,563	0,738	0,848	0,693	0,873	0,822
Avg. Var. Extract.	0,555	0,534	0,568	0,572	0,525	0,573	0,530
Full collin. VIF	1,975	2,402	3,305	4,103	2,358	2,737	4,298
Q-squared	0,542	0,476		0,654	0,316	0,518	0,707
Min	-5,380	-3,334	-3,652	-3,680	-3,885	-3,544	-3,902
Max	1,271	1,529	1,400	1,760	1,492	1,532	1,449
Median	0,208	0,265	0,069	0,227	0,299	0,170	0,169
Mode	1,271	0,365	1,070	0,021	0,770	-0,193	-0,328
Skewness	-2,154	-1,075	-0,940	-1,044	-1,487	-0,991	-1,353
Exc. Kurtosis	8,051	1,842	0,915	1,738	2,438	0,846	2,258
Unimodal – RS	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Unimodal – KMW	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Normal – JB	No	No	No	No	No	No	No
Normal – RJB	No	No	No	No	No	No	No

Fuente: elaboración propia.

4.2.4.5 Evaluación del ajuste del modelo – Prueba de robustez

Una vez se ha validado la información de los FM de manera individual, se valida el modelo general, esto se realiza con ayuda de los indicadores mostrados en la tabla 4.5. Para interpretar los resultados del SEM se analizan cuidadosamente varias pruebas estadísticas y un conjunto de índices para determinar que la estructura teórica propuesta suministra un buen ajuste a los datos empíricos. Este ajuste se verifica si los valores de los parámetros estimados reproducen tan estrechamente como sea posible la matriz observada de covarianza (Kahn, 2006), esto corresponde a la prueba de robustez del modelo para realizar la inferencia.

- **Índices de ajuste y calidad del modelo**

Con el propósito de medir la eficiencia del SEM, se usa el Análisis General de Resultados mostrado por el *software* WarpPLS. El modelo obtenido, a juicio de la investigadora, representa el fenómeno o constructo general, la madurez y cuenta con el mejor ajuste respecto a otros modelos estudiados. El modelo aceptado se presenta en la figura 4.6. Los resultados para este modelo se presentan en la tabla 4.5.

La calidad del modelo, conformado por los FM y sus relaciones, se identifica con ayuda de un grupo de indicadores con los cuales se conoce el nivel de ajuste a los datos obtenidos de los expertos. Estos son 10 indicadores del desempeño del modelo cuyos criterios de aceptación se explican en el Anexo 4.4. Es importante notar que los indicadores cuentan con un valor $P < 0,001$, mostrando una significancia de la información obtenida de un mínimo del $1 - 0,001 = 0,999$, o el 99,9 %.

Esto quiere decir que, con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$, se obtiene un nivel de confianza de $1 - \alpha = 0,95$, por tanto, para este estudio, cualquier valor P menor que $\alpha = 0,05$ es significativo para el análisis de las relaciones en el modelo. Esto también se verifica con la prueba de hipótesis que se presenta más adelante.

Tabla 4.5. Resultados del desempeño del SEM (Archivo de datos: EModel 111 VAR - Robust Path - V1.prj)

Indicador	Resultado	Criterio de aceptación
Average path coefficient (APC)	0,394	$P < 0,001$
Average R-squared (ARS)	0,494	$P < 0,001$
Average adjusted R-squared (AARS)	0,485	$P < 0,001$
Average block VIF (AVIF)	1,481	acceptable if ≤ 5 , ideally $\leq 3,3$
Average full collinearity VIF (AFVIF)	2,998	acceptable if ≤ 5 , ideally $\leq 3,3$
Tenenhau GoF (GoF)	0,522	small ≥ 0.1 , medium $\geq 0,25$, large $\geq 0,36$
Sympson's paradox ratio (SPR)	1,000	acceptable if $\geq 0,7$, ideally = 1
R-squared contribution ratio (RSCR)	1,000	acceptable if $\geq 0,9$, ideally = 1
Statistical suppression ratio (SSR)	1,000	acceptable if $\geq 0,7$
Nonlinear bivariate causality direction ratio (NLBCDR)	1,000	acceptable if $\geq 0,7$

Fuente: elaboración propia.

Como se puede verificar en la tabla 4.5, el SEM obtenido presenta un nivel adecuado de ajuste que permite explicar la robustez del modelo mismo.

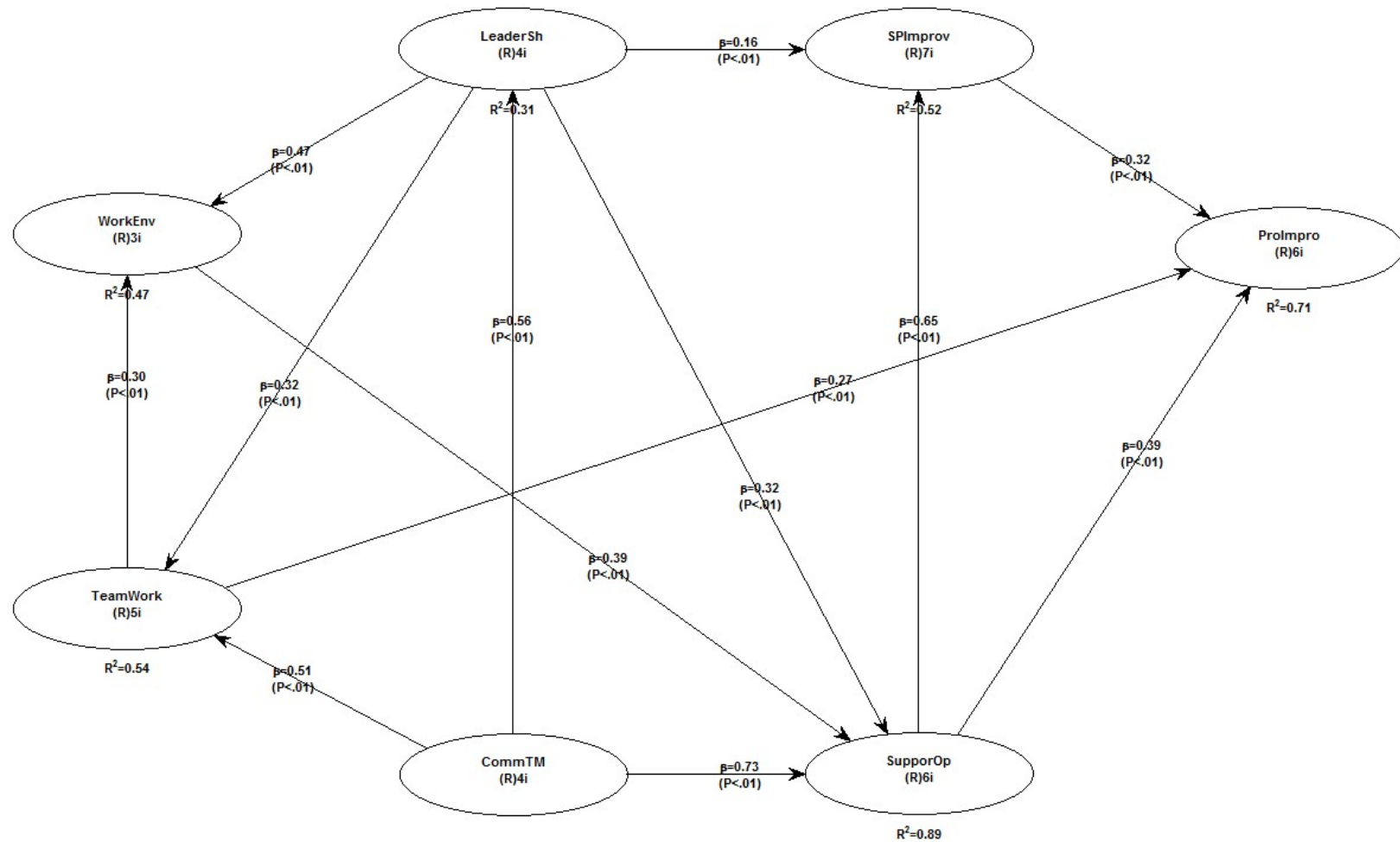


Figura 4.6. Modelo de Ecuaciones Estructurales para la Madurez de LC en la GP. Fuente: elaboración propia.

- **Prueba de hipótesis**

La prueba de hipótesis se realiza a todas las relaciones en el SEM, el concepto general es:

La hipótesis nula es,

$$H_0: \beta_i = 0, \text{ no existe una relación directa entre las variables latentes.}$$

Y la hipótesis alterna es,

$$H_i: \beta_i \neq 0, \text{ existe una relación directa entre las variables latentes.}$$

Para realizar la prueba de hipótesis, se calcula el valor de z. Se requiere el valor de la media poblacional y la media muestral, la desviación estándar y el tamaño de la muestra.

$$z = (x - \mu) / (\sigma / \sqrt{n})$$

Al obtener el valor de z, se busca en la Tabla de Probabilidades de la Distribución Normal Estándar y se encuentra el valor P. Este valor P se compara con el nivel de significancia α definido, que para este caso es $\alpha = 0,05$, y al comparar, se acepta o rechaza la hipótesis nula.

Con valores P menores de 0,05, no se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna: “Existe una relación directa y positiva entre las variables latentes”.

- **Intervalo de confianza**

Para identificar los intervalos de confianza para cada uno de los parámetros de las relaciones entre factores del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Límites del intervalo} = \beta_i \pm Z * \delta$$

Donde δ es el error relacionado con la medición y se calcula con la expresión $\delta = (\sigma / \sqrt{n})$.

Para nivel de significancia $\alpha = 0,05$, se calcula el área de la distribución normal sin uno de los lados de la cola, $1 - \alpha/2 = 0,975$, luego se busca en la Tabla de Probabilidades de la Distribución Normal Estándar el valor de Z, el $Z_{\alpha/2}$ correspondiente es de $Z_{\alpha/2}$ que es igual a 1,96.

El límite inferior del intervalo es:

$$LI = \beta_i - 1,96 * \delta$$

El límite superior del intervalo es:

$$LS = \beta_i + 1,96 * \delta$$

Si el intervalo de confianza incluye el cero, se tiene la certeza de que la β_i no es significativa.

En el Anexo 4.5 se presentan las pruebas de hipótesis para todas las relaciones en el SEM.

4.2.5 Determinación de las ecuaciones estructurales

El modelo de medida está conformado por los atributos que identifican o explican a los FM. Los atributos se denotan con X_i y los FM con Y_j . Los FM se denominan también variables endógenas y van ordenadas de menor a mayor según el grado de cercanía con respecto de los atributos, llamados también variables exógenas. Los FM con $Y_j < Y_{j+1}$ influyen en la definición de otros FM, los cuales se explican por los atributos relacionados y la influencia de los FM de los que ellos dependen o, dicho de otra manera, los FM que tienen efecto en ellos. El efecto de los atributos con respecto de los FM se indica por λ_{ji} , esta es la carga factorial (CF). El primer subíndice corresponde al FM receptor Y_j , y el segundo subíndice corresponde al atributo emisor X_i . Con relación a los FM, el efecto entre ellos se muestra con β_{ji} , donde el primer subíndice corresponde al FM receptor Y_j , y el segundo subíndice al FM emisor Y_{j-1} .

Entre los atributos no se consideran efectos, ellos no son causados por ninguna variable que miden directamente, así que la relación que existe entre ellos se expresa por el coeficiente de correlación. Entre ellas solo se presenta covariación, sin que se especifique la fuente de variabilidad. Respecto de los errores, estos se asocian con los atributos y los FM. Los errores asociados a los atributos se representan por δ_i , donde el subíndice corresponde al atributo X_i . De igual manera, ζ_j corresponde al error asociado con el FM Y_j .

Por ejemplo: la ecuación estructural para el FM, CommTM, identificado como Y_1 , viene dada por:

$$Y_1 = \sum \lambda_{1i} X_i + \zeta_1$$

Donde X_i : ($X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}$), i corresponde a los atributos que explican al FM Y_1 .

De igual manera, la ecuación para el FM, LeaderSh denominado como el FM Y_2 , se compone de los atributos que lo explican y el efecto directo de Y_1 representado por β_{21} .

$$Y_2 = \sum \lambda_{2i} X_i + \beta_{21} Y_1 + \zeta_2$$

Donde X_i : (X_{19} , X_{20} , X_{21} , X_{22}), i corresponde a los atributos que explican al factor Y_2 .

Para los demás FM, cada una de las ecuaciones considera los efectos de los atributos asociados con cada uno de ellos. El efecto directo de los FM causa efectos indirectos en los FM ubicados entre dos y seis segmentos atrás del FM que recibe el efecto. En la siguiente sección, luego de la identificación de las relaciones entre los elementos de madurez, se presentan las ecuaciones estructurales resultantes del SEM.

4.2.6 Expresión matricial de las ecuaciones estructurales del modelo

La notación para las expresiones matemáticas de las ecuaciones estructurales más utilizada es LISREL⁶ y hace uso de letras griegas, las cuales se utilizan en minúscula para desplegar las ecuaciones, y en mayúscula para denotar las matrices (Newsom, 2015).

El SEM se compone de dos modelos, el Modelo Estructural o interno, o *Inner Model*, y el Modelo de Medida o externo, u *Outer Model*.

4.2.6.1 Modelo Estructural

El modelo estructural tiene la forma:

$$\eta = \Gamma \xi + B \eta + \zeta$$

Esta forma representa las matrices asociadas, donde:

η : (Eta) Variables latentes endógenas, FM endógenos.

Γ : (Gamma) Se refiere a la matriz $q \times r$ de coeficientes de regresión entre variables latentes exógenas, FM exógenos y variables latentes endógenas, FM endógenos.

⁶ LISREL, es el acrónimo de Linear Structural Relations). Es un programa usado en SEM. Desarrollado en la década del 70 por Jöreskog y Dag Sörbom (Jöreskog, 1993), profesores de la Universidad de Upsala, Suecia. Lo distribuye la empresa SSI (Scientific Software International).

ξ : (Xi o Ksi) Variables latentes exógenas, FM exógenos.

B: (Beta) Es una matriz de $q \times q$, una matriz de coeficientes de regresión entre variables latentes endógenas, FM endógenos.

ζ : (Zeta) Alteraciones, o errores debidos a las variables endógenas, FM endógenos.

La expresión matricial se desarrolla con letras minúsculas para los parámetros de estas matrices, las cuales tienen las mismas interpretaciones que las anteriores.

γ : Trayectoria causal de una variable latente exógena a una variable latente endógena.

β : Trayectoria causal entre variables latentes endógenas.

4.2.6.2 Matrices de ecuaciones para el Modelo Estructural

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \times \xi_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{31} & 0 & 0 & \beta_{34} & 0 & 0 \\ \beta_{41} & \beta_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{62} & \beta_{63} & 0 & \beta_{65} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \\ \zeta_5 \\ \zeta_6 \end{bmatrix}$$

4.2.6.3 Modelo de Medida

El Modelo de Medida se compone de las variables observadas, o medidas, los atributos, relacionadas con las variables latentes exógenas (FM exógenos), y las variables observadas, atributos, relacionadas con las variables latentes endógenas (FM endógenos).

$$\xi = \Lambda_x x + \delta$$

$$\eta = \Lambda_y y + \epsilon$$

Estas formas representan las matrices para cada una de las relaciones descritas, donde:

X: El resultado de la suma de las cargas factoriales multiplicadas por los atributos x. Esto explica la variable latente exógena (FM exógeno).

Y: El resultado de la suma de las cargas factoriales multiplicadas por los atributos y. Esto explica la variable latente endógena (FM endógeno).

Λ_x : (Lamda) Son cargas factoriales de las variables observadas, o medidas, atributos. Los x que explican las variables latentes exógenas (FM exógeno), el ξ .

Λ_y : (Lamda) Son cargas factoriales de las variables observadas, o medidas, atributos. Los y que explican las variables latentes endógenas (FM endógeno), el η .

ξ : (Xi o Ksi) Variables latentes exógenas (FM exógenos).

η : (Eta) Variables latentes endógenas (FM endógenos).

δ : (Delta) Alteraciones o errores debidos a las variables observadas o medidas x , atributos, relacionadas con la variable latente exógena (FM exógeno).

ϵ : (Épsilon) Alteraciones o errores debidos a las variables observadas o medidas y , atributos, relacionadas con la variable latente endógena (FM endógeno).

Las expresiones matriciales se desarrollan con letras minúsculas para los parámetros de estas matrices, las cuales tienen las mismas interpretaciones que las anteriores.

4.2.6.4 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM exógeno - CommTM

$$\xi_1 = [\lambda_{9\ 1} \quad \lambda_{10\ 1} \quad \lambda_{11\ 1} \quad \lambda_{12\ 1}] \begin{bmatrix} x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{bmatrix}$$

4.2.6.5 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - LeaderSh

$$\eta_1 = [\lambda_{19\ 2} \quad \lambda_{20\ 2} \quad \lambda_{21\ 2} \quad \lambda_{22\ 2}] \begin{bmatrix} x_{19} \\ x_{20} \\ x_{21} \\ x_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{19} \\ \epsilon_{20} \\ \epsilon_{21} \\ \epsilon_{22} \end{bmatrix}$$

4.2.6.6 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - SupporOp

$$\eta_2 = [\lambda_{1\ 3} \quad \lambda_{2\ 3} \quad \lambda_{3\ 3} \quad \lambda_{4\ 3} \quad \lambda_{5\ 3}] \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \end{bmatrix}$$

4.2.6.7 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - TeamWork

$$\eta_3 = [\lambda_{13\ 3} \quad \lambda_{14\ 3} \quad \lambda_{15\ 3} \quad \lambda_{16\ 3} \quad \lambda_{17\ 3} \quad \lambda_{18\ 3}] \begin{bmatrix} x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \\ x_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{13} \\ \epsilon_{14} \\ \epsilon_{15} \\ \epsilon_{16} \\ \epsilon_{17} \\ \epsilon_{18} \end{bmatrix}$$

4.2.6.8 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - WorkEnv

$$\eta_4 = [\lambda_{6\ 4} \quad \lambda_{7\ 4} \quad \lambda_{8\ 4}] \begin{bmatrix} x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_6 \\ \epsilon_7 \\ \epsilon_8 \end{bmatrix}$$

4.2.6.9 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno – SPImprov

$$\eta_5 = [\lambda_{23\ 5} \quad \lambda_{24\ 5} \quad \lambda_{25\ 5} \quad \lambda_{26\ 5} \quad \lambda_{27\ 5} \quad \lambda_{28\ 5} \quad \lambda_{29\ 5}] \begin{bmatrix} x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{26} \\ x_{27} \\ x_{28} \\ x_{29} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{23} \\ \epsilon_{24} \\ \epsilon_{25} \\ \epsilon_{26} \\ \epsilon_{27} \\ \epsilon_{28} \\ \epsilon_{29} \end{bmatrix}$$

4.2.6.10 Matrices de ecuaciones para el Modelo de Medida FM endógeno - ProImpr

$$\eta_6 = [\lambda_{30\ 6} \quad \lambda_{31\ 6} \quad \lambda_{32\ 6} \quad \lambda_{33\ 6} \quad \lambda_{34\ 6} \quad \lambda_{35\ 6}] \begin{bmatrix} x_{30} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{35} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{30} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{34} \\ \epsilon_{35} \end{bmatrix}$$

4.2.7 Ensamble de las ecuaciones estructurales en notación LISREL

El SEM resulta de los modelos de medida y el estructural, sus ecuaciones se agregan para conformar las ecuaciones del modelo, según las siguientes estructuras:

- **Modelo de Medida**

$$\xi = \Lambda_x x + \delta$$

$$\eta = \Lambda_y y + \epsilon$$

- **Modelo Estructural**

$$\eta = \Gamma\xi + B\eta + \zeta$$

4.2.8 Puntos clave de la sección

Los atributos se encuentran adecuadamente correlacionados y explican el FM respectivo. Se confirma tanto la validez de los FM con los indicadores del SEM como la validez del SEM, lo cual es el primer paso que lleva a considerar que las relaciones identificadas con este método explican el fenómeno de madurez de LC en la GPC. De igual forma, podrá explicarse cualquier otro fenómeno de madurez en cualquier sector, al adaptar a partir de su condición de modelo genérico de evolución.

4.3 Identificación de las relaciones de madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

En esta sección se presentan, a partir de la obtención del SEM, las relaciones entre los elementos que permiten identificar la madurez de LC en la GPC. Las relaciones se establecen entre atributos de madurez, los cuales explican los FM, a su vez los FM se agrupan en un concepto global de madurez representado por el índice global de madurez (IGM), el cual se desarrolla en el siguiente capítulo. Se analizan las relaciones directas e indirectas obtenidas con el SEM luego de verificar la validez de los atributos, los factores de madurez (FM) y el SEM mismo. El análisis de relaciones ofrece información confiable para la obtención de las ecuaciones estructurales con las cuales se desarrolla el Modelo de Calificación de Madurez (SLC-QM).

El Modelo de Evolución de LC en la GPC (SLC-EModel) tiene la capacidad de ser aplicado a cualquier proceso de producción o servicios. Lo valioso de este modelo es que se origina en el interés de evaluar la integración de la Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción, sin embargo, como resultado de la investigación se obtiene un

modelo con características más generales que le dan las condiciones para ser adaptado a la gestión de otros procesos de producción de bienes y servicios.

En esta sección se describen las relaciones entre los elementos de madurez, de las cuales emerge esa característica genérica que convierte a este en un Modelo Genérico de Valoración y Evolución de la Madurez que puede ser adaptado a otros sectores y a procesos de producción o servicios. En esta etapa de desarrollo del modelo, se identifican las relaciones entre los atributos (correlaciones), entre los atributos y los FM y entre los FM.

4.3.1 Construcción de los factores de madurez

El SEM desarrollado para esta investigación consolida un modelo genérico por medio del cual se valora la madurez en cualquier proceso de producción o servicios. Resulta muy valioso que a partir del interés en conocer cómo es el proceso de evolución de la madurez de LC en la GPC, se pueda adaptar a otro sector. Con ayuda del SEM se identifican las relaciones entre los FM.

Las relaciones directas e indirectas reflejan la influencia y dependencia entre ellos, la fuerza de estas influencias y los efectos que resultan a causa de ellas. Con base en esta estructura se construye el Modelo de Evaluación de la Madurez (SLC-MM), el cual requiere de una herramienta práctica para evaluar en campo el estado de madurez de cada uno de los atributos (SLC-MAET). Esta herramienta se desarrollará posterior a esta investigación.

Primero se identifican las relaciones entre los atributos, lo cual permite su agrupamiento en un concepto o constructo, el FM. Posteriormente, se relacionan los FM y se verifica la validez de dichas relaciones.

4.3.1.1 Relaciones entre los atributos y los factores de madurez

Los FM representan conceptos claves que coinciden con los expresados por expertos consultados en esta investigación y las referencias bibliográficas. La correlación entre los atributos se verifica por medio de un análisis factorial, técnica que permite describir un conjunto de datos en nuevas variables (o componentes o FM) que están relativamente incorrelacionadas. De esta manera se explica la mayor parte de la variabilidad de cada FM.

Los atributos se agrupan de acuerdo con la cantidad de varianza original que describen, reduciendo la dimensionalidad del conjunto de datos. Los atributos más correlacionados son los que componen el respectivo FM. Las CF se identifican con la letra griega λ , y con subíndices j e i , donde i es el subíndice del atributo X_i y j el subíndice del FM con el que están directamente relacionados según la CF. En otras palabras, el FM está explicado por los atributos correlacionados.

Por ejemplo, el factor TeamWork, Y_3 , es explicado por cinco atributos (tabla 4.6), y con las CF λ_{3i} se construyen las ecuaciones estructurales de este nivel.

Tabla 4.6. Cargas factoriales del FM (TeamWork)

Cargas factoriales de los atributos que explican el factor de madurez			
Atributo X_i		λ_{3i}	TeamWork Y_3
LL2	X_1	0,715	
PS2	X_2	0,768	
TW2	X_3	0,792	
TW1	X_4	0,737	
LL3	X_5	0,710	

Fuente: elaboración propia.

4.3.1.2 Ecuaciones estructurales de los atributos y el factor de madurez asociado

$$Y_j = \sum \lambda_{ji} * X_i$$

Donde:

Y_j : Factor de madurez j , donde j : (1,7)

λ_{ji} : Carga factorial del atributo X_i asociado al factor de madurez j

X_i : Es el atributo de madurez i , donde i : (1,5)

Estas ecuaciones solo representan de manera independiente, para cada FM, el efecto de los atributos que lo explican. Este efecto corresponde a la suma de los efectos individuales representados por las CF de cada atributo. A continuación, se presentan las ecuaciones estructurales para cada uno de los FM, sin incluir efectos de otros FM:

$$Y_1 = \sum \lambda_{1i} * X_i, \quad \text{Donde } i (9, 10, 11, 12) \quad (1)$$

$$Y_2 = \sum \lambda_{2i} * X_i, \quad \text{Donde } i (19, 20, 21, 22) \quad (2)$$

$$Y_3 = \sum \lambda_{3i} * X_i, \quad \text{Donde } i (1, 2, 3, 4, 5) \quad (3)$$

$$Y_4 = \sum \lambda_{4i} * X_i, \quad \text{Donde } i (6, 7, 8) \quad (4)$$

$$Y_5 = \sum \lambda_{5i} * X_i, \quad \text{Donde } i (13, 14, 15, 16, 17, 18) \quad (5)$$

$$Y_6 = \sum \lambda_{6i} * X_i, \quad \text{Donde } i (23, 24, 25, 26, 27, 28, 29) \quad (6)$$

$$Y_7 = \sum \lambda_{7i} * X_i, \quad \text{Donde } i (30, 31, 32, 33, 34, 35) \quad (7)$$

4.3.2 Relaciones directas entre los factores de madurez

Una de las principales características del SEM es la capacidad de identificar las relaciones entre los FM que lo componen. Estas relaciones muestran los efectos directos e indirectos entre los FM considerando diferentes rutas y segmentos en cada ruta. Los efectos directos son los más importantes, sin embargo, se pueden presentar efectos indirectos tanto o más relevantes que los directos para los FM que reciben dichos efectos. También se puede

identificar el tamaño de esos efectos. Esta magnitud es fundamental para precisar la influencia en los FM de los que se recibe el efecto.

4.3.2.1 Relaciones directas y tamaño de los efectos

Las relaciones que se confirman con el SEM corresponden con los coeficientes de ruta para los efectos directos. Estos coeficientes de ruta se identifican con la letra griega β , y representan los factores de regresión entre los FM. Un coeficiente positivo representa una relación directa y explica que por cada unidad de cambio en el FM de origen implica una β unidad de cambio en el FM de llegada. El FM de origen es llamado predictor o regresor, y el FM de llegada se denomina criterio. De otra parte, un coeficiente negativo representa una relación inversa, así, cada unidad de cambio del FM de origen implica una β unidad de cambio inversa en el FM de llegada o criterio.

En esta investigación se comprueba que las relaciones entre los FM del modelo en todos los casos son positivas con β positivos, lo que confirma relaciones directas y positivas entre ellos. En la tabla 4.7, el FM independiente está ubicado en la columna y el FM dependiente, en la fila, de tal manera que en el cruce de las columnas con las filas se ubican los coeficientes β que indican la “fuerza” o efecto de las relaciones directas entre los FM. Los β_{ji} son los coeficientes con los que se construyen las ecuaciones estructurales.

Tabla 4.7. Coeficientes de ruta β_{ji} . Efecto directo

Coeficientes de ruta β_{ji} . Efecto directo							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,506	0,324					
WorkEnv		0,468	0,295				
SupporOp	0,726	0,322		0,390			
SPImprov		0,159			0,650		
ProImpr			0,272		0,387	0,323	

Fuente: elaboración propia.

Las relaciones directas entre los FM pueden ser consultadas en el Anexo 4.5, así como las otras pruebas de hipótesis, verificando con ellas que todas las relaciones directas y su significancia en esta investigación sean válidas. Las ecuaciones debidas a las relaciones directas se presentan a continuación.

4.3.2.2 Ensamble de las ecuaciones estructurales para efectos directos

Las ecuaciones estructurales para efectos directos son del tipo:

$$Y_j = \sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)} + \sum \lambda_{ji} X_i + \zeta$$

Donde:

Y_j : Factor de madurez

X_i : Atributo de madurez

β_{ij} : Coeficiente de ruta entre factores de madurez

λ_{ji} : Carga factorial del atributo de madurez

ζ : Error de estimación del factor

$\sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)}$: corresponde a los efectos de las rutas directas que llegan al factor j.

El error corresponde a la estimación de los efectos en el FM. En esta investigación, este error no se consideró en razón a que había suficiente información recolectada (Kline, 2011). Esto se fundamenta en que se requería una muestra mínima de 90 respuestas y se obtuvieron 111. En la medida en que la muestra aumenta, este error es más pequeño (García, 2011). Así, las ecuaciones para cada FM con relación a los efectos directos contienen el efecto de los atributos que lo explican y la influencia del FM que lo impactan.

$$Y_j = \sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)} + \sum \lambda_{ji} X_i,$$

Donde Y_{j-1} : Son los factores de los cuales se recibe el efecto.

$$Y_2 = \beta_{21} Y_1 + \sum \lambda_{2i} X_i, \quad (8)$$

$$Y_3 = \beta_{31} Y_1 + \beta_{32} Y_2 + \sum \lambda_{3i} X_i, \quad (9)$$

$$Y_4 = \beta_{43} Y_3 + \beta_{42} Y_2 + \sum \lambda_{4i} X_i, \quad (10)$$

$$Y_5 = \beta_{51} Y_1 + \beta_{52} Y_2 + \beta_{54} Y_4 + \sum \lambda_{5i} X_i, \quad (11)$$

$$Y_6 = \beta_{62} Y_2 + \beta_{65} Y_5 + \sum \lambda_{6i} X_i, \quad (12)$$

$$Y_7 = \beta_{73} Y_3 + \beta_{75} Y_5 + \beta_{76} Y_6 + \sum \lambda_{7i} X_i \quad (13)$$

4.3.2.3 Tamaño de los efectos directos para los factores de madurez

La contribución de los FM exógenos en el FM endógeno se expresa con el indicador R^2 . El tamaño del efecto permite evaluar cómo el FM exógeno contribuye en la identificación del FM endógeno como una medida de relevancia predictiva. El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo, o la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. Este indicador refleja la bondad del ajuste del modelo para explicar la madurez. En el modelo, este indicador se calcula para cada FM dependiente como un resultado del WarpPLS.

Los tamaños de los efectos se leen en el cruce de la columna del FM independiente sobre el FM en el que produce el efecto, como se observa en la tabla 4.8. La medida del efecto puede mostrar un efecto pequeño con 0,02, mediano para 0,15, o grande para 0,35. Sin embargo, esta escala recomendada por Kock (2017) no establece intervalos para el análisis, por lo cual para esta investigación se establecen los siguientes:

- Efectos pequeños entre 0,02 y 0,15
- Efectos medianos entre 0,15 y 0,35
- Efectos grandes a partir de 0,35

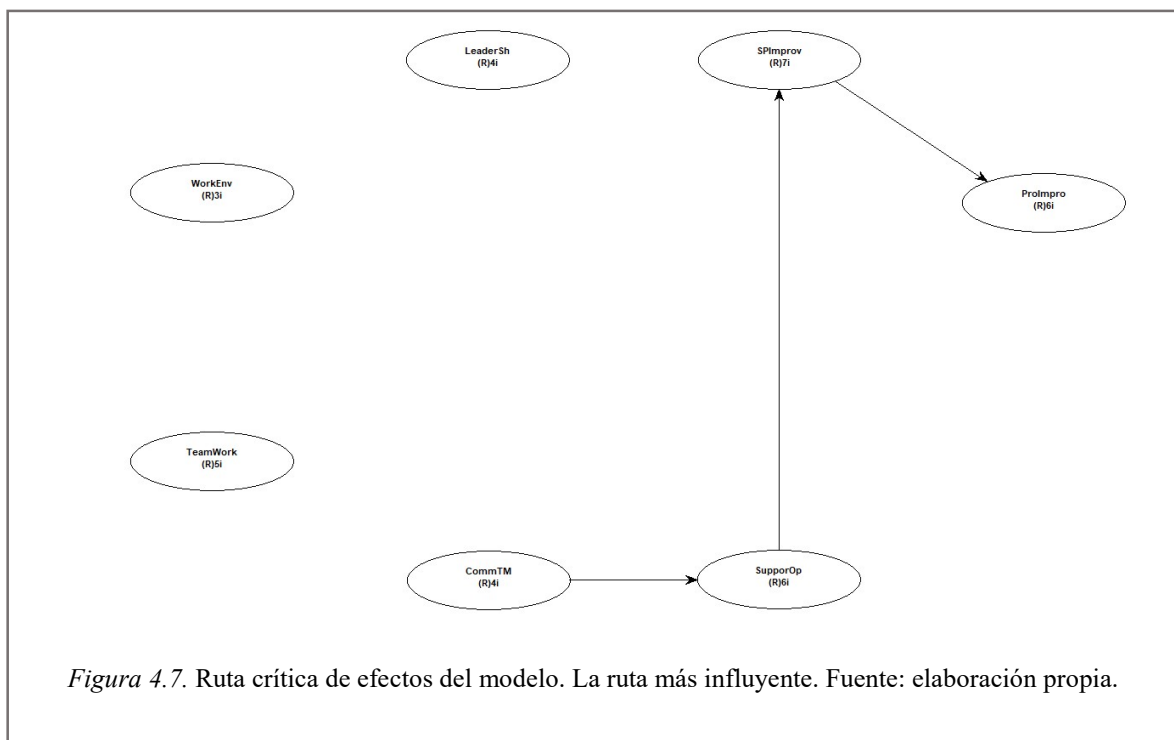
Los efectos de los FM independientes en los FM dependientes, en general, son grandes, en un rango que va desde el 31,1 % al 89,0 %, como se muestran en la tabla 4.8 para cada FM.

Tabla 4.8. Tamaño de los efectos directos

Tamaño de los efectos directos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh	0,311							0,311
TeamWork	0,345	0,194						0,539
WorkEnv		0,300	0,169					0,469
SupporOp	0,546	0,119		0,225				0,890
SPImprov		0,063			0,459			0,522
ProImpr			0,172		0,294	0,240		0,706

Fuente: elaboración propia.

Se presta particular atención a los efectos grandes (β_i), ya que por medio de ellos se conforma la ruta crítica del modelo. En este caso, la ruta crítica corresponde al Compromiso de la Alta Dirección (CommTM), Soporte Operativo (SupporOp), Mejoramiento del Sistema de Producción (SPImprov) y Mejoramiento de la Producción (ProImpr) (figura 4.7).



4.3.3 Relaciones indirectas entre los factores de madurez

Los efectos indirectos, en ocasiones, pueden llegar a ser más importantes que los efectos directos. Esto tiene que ver con que las rutas desde un FM exógeno hasta el endógeno influyen en este efecto. Los efectos indirectos en el modelo se presentan entre dos y seis segmentos, los cuales dependen de la cantidad de relaciones que se requieran para llegar desde un FM exógeno al endógeno más alejado.

Todas las rutas que se analizan a continuación hacen referencia a la figura 4.6 se pueden consultar en el Anexo 4.5. De igual manera, en el Anexo 4.5 se presenta el análisis de los efectos indirectos, las pruebas de hipótesis, verificando la validez de las relaciones indirectas y la significancia de dichas relaciones.

A continuación, se realiza el análisis de las relaciones y los efectos indirectos para rutas entre dos y seis segmentos.

4.3.3.1 Efectos indirectos para rutas de dos segmentos y tamaño de los efectos

Se detalla la relación en las rutas de dos segmentos, donde un FM exógeno influye en uno endógeno por esta ruta, tal como se presenta en la tabla 4.9.

Tabla 4.9. Efectos indirectos de dos segmentos

Efectos indirectos de dos segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	0,181						
WorkEnv	0,410	0,096					
SupporOp	0,179	0,183	0,115				
SPImprov	0,560	0,209		0,254			
ProImpr	0,419	0,264		0,151	0,210		

Fuente: elaboración propia.

- ***Tamaño de los efectos indirectos para dos segmentos***

El tamaño de los efectos lo producen los FM exógenos en el FM endógeno, por las rutas por las que influye un FM en otros. En este caso, el efecto indirecto sobre SPImprov y ProImpr es tan grande como los efectos directos respectivamente (tabla 4.10).

Tabla 4.10. Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos

Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork	0,123							0,123
WorkEnv	0,207	0,062						0,269
SupporOp	0,135	0,067	0,053					0,255
SPImprov	0,334	0,082		0,090				0,506
ProImpr	0,317	0,145		0,089	0,160			0,711

Fuente: elaboración propia.

4.3.3.2 Efectos indirectos para rutas de tres segmentos y tamaño de los efectos

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos según la tabla 4.11.

Tabla 4.11. Efectos indirectos de tres segmentos

Efectos indirectos de tres segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv	0,053						
SupporOp	0,160	0,037					
SPImprov	0,117	0,119	0,075				
ProImpr	0,299	0,138	0,045	0,082			

Fuente: elaboración propia.

- ***Tamaño de los efectos indirectos para tres segmentos***

En rutas de tres segmentos no hay efectos en TeamWork y LeaderSh (Tabla 4.12).

Tabla 4.12. Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos

Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv	0,027							0,027
SupporOp	0,121	0,014						0,135
SPImprov	0,070	0,047	0,026					0,143
ProImpr	0,227	0,076	0,028	0,048				0,379

Fuente: elaboración propia.

4.3.3.3 Efectos indirectos para rutas de cuatro segmentos y tamaño de los efectos

Para cada ruta de cuatro segmentos se revisan los efectos según la tabla 4.13.

Tabla 4.13. Efectos indirectos de cuatro segmentos

Efectos indirectos de cuatro segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp	0,021						
SPImprov	0,104	0,024					
ProImpr	0,100	0,053	0,024				

Fuente: elaboración propia.

- **Tamaño de los efectos indirectos para cuatro segmentos**

En rutas de cuatro segmentos no hay efectos en TeamWork, WorkEnv y LeaderSh (tabla 4.14).

Tabla 4.14. Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos

Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv								
SupporOp	0,016							0,016
SPImprov	0,062	0,010						0,072
ProImpr	0,076	0,029	0,015					0,120

Fuente: elaboración propia.

4.3.3.4 Efectos indirectos para rutas de cinco segmentos y tamaño de los efectos

Para cada ruta de cinco segmentos se revisan los efectos según la tabla 4.15.

Tabla 4.15. Efectos indirectos de cinco segmentos

Efectos indirectos de cinco segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp							
SPImprov	0,014						
ProImpr	0,042	0,008					

Fuente: elaboración propia.

- **Tamaño de los efectos indirectos para cinco segmentos**

En este análisis se identifican efectos indirectos conjuntos para cinco segmentos (tabla 4.16).

Tabla 4.16. Tamaño de los efectos indirectos de cinco segmentos

Tamaño de los efectos indirectos de cinco segmentos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv								
SupporOp								
SPImprov	0,008							0,008
ProImpr	0,032	0,004						0,036

Fuente: elaboración propia.

4.3.3.5 Efectos indirectos para rutas de seis segmentos y tamaño de los efectos

Solo se presenta una ruta de seis segmentos cuyo efecto es muy pequeño (0,004), así como el tamaño del efecto que corresponde a 0,003.

4.3.4 Efectos totales y tamaños de los efectos

Los efectos totales corresponden a los efectos directos más los efectos indirectos. En la tabla 4.17 se resumen los efectos entre los FM.

Tabla 4.17. Resumen de los efectos en el modelo

Efectos directos							
Factor endógeno	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,506	0,324					
WorkEnv		0,468	0,295				
SupporOp	0,726	0,322		0,390			
SPImprov		0,159			0,650		
ProImpr			0,272		0,387	0,323	
Suma de los efectos indirectos							
Factor endógeno	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	0,181						
WorkEnv	0,464	0,096					
SupporOp	0,361	0,220	0,115				
SPImprov	0,795	0,352	0,075	0,254			
ProImpr	0,864	0,463	0,069	0,233	0,210		
Efectos totales							
Factor endógeno	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,687	0,324					
WorkEnv	0,464	0,564	0,295				
SupporOp	1,087	0,542	0,115	0,390			
SPImprov	0,795	0,511	0,075	0,254	0,650		
ProImpr	0,864	0,463	0,341	0,233	0,597	0,323	

Fuente: elaboración propia.

Los efectos directos e indirectos actúan de forma conjunta en el FM, con lo cual se obtiene un panorama especial con respecto al tamaño total de los efectos en cada uno de los FM, como se aprecia en la parte inferior de la tabla 4.17. Para el modelo, los efectos totales son medianos y grandes, excepto los correspondientes a las relaciones TeamWork y SupporOp y

TeamWork y SPImprov que corresponden a efectos totales pequeños. De igual manera, para las relaciones indirectas se presenta a continuación un análisis del tamaño de dichos efectos.

4.3.4.1 Efectos indirectos pequeños

Corresponden a las relaciones indirectas entre LeaderSh y TeamWork 0,096, TeamWork y SPImprov de 0,075 y TeamWork y ProImpr, lo que demuestra que estos efectos no son muy importantes. El efecto entre TeamWork y SupporOp, aunque está en el rango de efectos pequeños, se muestra influyente en SupporOp.

4.3.4.2 Efectos indirectos medianos

CommTM y TeamWork con 0,181, LeaderSh y SupporOp con 0,220, WorkEnv y SPImprov con 0,254, WorkEnv y ProImpr con 0,233 y SupporOp y ProImpr con 0,210. Todos ellos medianos y cada vez más importantes para el desempeño del modelo.

4.3.4.3 Efectos indirectos grandes

El efecto del resto de relaciones es grande, por encima de 0,352 que corresponde a LeaderSh y SPImprov. El efecto más grande se produce en la relación que hay entre CommTM y ProImpr de 0,864, efectos muy importantes para el desempeño del modelo.

4.3.5 Efectos moderadores

En este modelo no se presentan acciones para variables moderadoras.

4.3.6 Puntos clave de la sección

La mayor cantidad de los efectos directos entre los FM son grandes, solo dos efectos aparecen como medianos. Todos ellos relevantes para entender la lógica de la madurez relacionada con el efecto de unos FM sobre otros para la construcción de artefactos de evaluación y calificación de la madurez de LC en la GPC.

Doce de las quince relaciones indirectas muestran efectos importantes en algunos FM. Esta situación refuerza el hecho de que la influencia de los FM viaja hacia los FM más alejados

con un efecto importante, a pesar de estar más de dos segmentos atrás. Esto confirma que este modelo permite visualizar la manera en que se producen estas influencias.

Capítulo 5

MODELO DE EVOLUCIÓN DE LEAN CONSTRUCTION EN LA GESTIÓN DE PRODUCCIÓN DE PROYECTOS DE CONSTRUCCIÓN SLC-EMODEL

Resumen

Este capítulo despliega el desarrollo del Modelo de Evolución de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-EModel). El SLC-EModel se compone de un Modelo de Madurez (MM) y una estrategia que conduce a una ruta para alcanzar el siguiente nivel de madurez. Con la aplicación del MM se obtienen indicadores con los que se reconoce el nivel de madurez alcanzado por la Gestión de producción de proyectos de construcción (GPC), al integrar a Lean Construction como una estrategia de mejora de la eficiencia del proceso de producción del proyecto. Es importante resaltar que con el propósito de obtener un Modelo de Evolución de la Madurez se desarrolló un modelo con características genéricas que puede ser adaptado para evaluar la madurez de otros procesos de producción de bienes o servicios.

En la primera sección se desarrolla el Modelo de Madurez (SLC-MM) obtenido de los resultados del Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM) y se presenta la primera parte de la aplicación del modelo a partir de un ejemplo que se complementa en la siguiente sección. La segunda sección contiene la Estrategia de Evolución (SLC-ES), la cual contiene los pasos para su aplicación y para apoyar la toma decisiones respecto del camino que se debe seguir para avanzar al siguiente nivel de madurez.

5.1 Estructura del Modelo de Evolución de Madurez de Lean Construction en la Gestión de Proyectos de Construcción (SLC-EModel)

El Modelo de Evolución de la Madurez de LC en la GPC (SLC-EModel), o Systemic Lean Construction Evolution Model, se compone de dos artefactos por medio de los cuales se despliegan las acciones de evaluación y evolución. En la tabla 5.1 se presenta el esquema que representa la estructura del SLC-EModel.

El primer artefacto del SLC-EModel es el Modelo de Evaluación de Madurez de LC en la GPC (SLC-MM), o Systemic Lean Construction Maturity Model, por medio del cual se identifica el nivel de madurez de LC en la GPC. Para realizar esta identificación, el SLC-MM requiere de dos herramientas: la Herramienta de Evaluación de Madurez de los Atributos relacionados con la madurez de LC en la GPC (SLC-MAET), o Systemic Lean Construction Maturity Attributes Evaluation Tool, y la Herramienta de Calificación de Madurez (SLC-QT), o Systemic Lean Construction Qualification Tool, por medio de la cual se califica la madurez de los FM y el nivel de madurez de LC en la Gestión de producción de proyectos de construcción.

El objetivo de esta investigación es la construcción del SLC-EModel, y se alcanza con el desarrollo de la estructura general del modelo de evolución, quedando para trabajos futuros el desarrollo de la SLC-MAET, la cual no es del alcance de esta investigación. Esta herramienta requiere el detalle de las rubricas para calificar la madurez de cada atributo. Es así que, el aporte de la investigación es la revelación de las relaciones entre los elementos responsables de la madurez y la obtención del modelo de evolución.

El segundo artefacto es la Estrategia de Evolución de Madurez (SLC-ES), o Systemic Lean Construction Evolution Strategy, con la cual se identifica la ruta más apropiada para direccionar las acciones que contribuyan a alcanzar sistemáticamente el siguiente nivel de madurez, tomando como base los resultados del SLC-MM. Este artefacto consta de un procedimiento para seleccionar la configuración de madurez de cada uno de los atributos en el modelo que mejor se ajuste a las capacidades de la organización. Y un procedimiento para obtener el Plan Maestro de Evolución, el cual permite realizar la planificación y el control de su implementación.

Tabla 5.1 Estructura general del SLC-EModel

SLC - EModel									
SLC – MM (Modelo de Evaluación de Madurez) 3 categorías, 7 Factores de Madurez y 35 Atributos de Madurez						SLC – ES (Estrategia de Evolución de Madurez)			
SLC – MAET (Herramienta de Evaluación)			SLC – QM (Herramienta de Calificación)			Definición de la Madurez Objetivo		Plan de Maestro de Evolución	
C1: Personas	C2: Sistema de Producción	C3: Organización	ILM (Índice Local de Madurez)	IGM (Índice Global de Madurez)	PERFILES	IGM Objetivo	ILM Posibles	PERFIL Seleccionado	Plan de Mejoramiento
									Plan de Acción y Seguimiento

Fuente: elaboración propia.

5.2 Modelo de Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-MM)

En esta investigación, la madurez de LC en la GPC es un constructo que se mide de manera indirecta a través siete factores de madurez (FM). Los FM se explican por medio de atributos altamente correlacionados que son medidos directamente en el Sistema de Producción de Proyectos de Construcción, con la identificación del nivel de madurez de cada FM, representado por el índice local de madurez (ILMi). A partir del conocimiento de los ILM se puede calificar la madurez de todo el proceso, lo que se lleva a cabo con el índice global de madurez (IGM). Este índice permite conocer el estado de madurez de la GPC al integrar la LC como una estrategia de mejoramiento de la eficiencia de la productividad de la organización de construcción. La obtención del IGM a partir de los ILM corresponde al desarrollo de un constructo de segundo orden que se lleva a cabo por medio del Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM) de segundo orden.

En esta sección se explican conceptos básicos del SEM de segundo orden que son la base para la construcción del IGM, se presenta el proceso para la obtención de cada uno de los ILM_i con los cuales se obtienen el IGM_o ⁷. Este IGM_o es el indicador que muestra el nivel de madurez de LC en la GPC en su escala original, y que se transforma a una escala para el mejor entendimiento de los niveles de madurez alcanzados. Con los ILM se construyen los perfiles de madurez que explican gráficamente el estado de la madurez del proceso en evaluación. En esta sección se construyen los perfiles de madurez de referencia para cada nivel de madurez del modelo. Estos tres productos, los ILM, el IGM y los perfiles de madurez son insumos para entender el estado actual de la madurez de LC en la GPC, y a partir de esta información, se propone la estrategia para alcanzar el nivel de madurez objetivo de acuerdo con la disponibilidad de recursos de la organización.

El Modelo de Madurez de LC en la GPC (SLC-MM) se compone de dos artefactos: una Herramienta de Evaluación de la Madurez (SLC-MAET) y una Herramienta de Calificación de la Madurez (SLC-QT). Para desarrollar el SLC-QT es necesario obtener la formulación para calcular el ILM y el IGM, lo que se presenta en esta sección.

El SLC-EModel, a pesar de haber sido desarrollado con el interés particular de identificar la mejor forma de evolución de la madurez de LC en la GPC, se presenta como un *modelo genérico* que puede ser adaptado para ser aplicado a otras industrias, o cualquier tipo de proceso de producción de bienes o servicios o del desarrollo de la gestión de proyectos. Cada uno de los elementos en el modelo tiene la capacidad de representar procesos de producción en diferentes industrias, ya que cualquiera de ellas se compone de las Personas que forman parte del proceso, el Soporte que la organización ofrece para llevar a cabo la producción y el Proceso mismo de producción.

5.2.1 Modelos de ecuaciones estructurales de segundo orden

Para obtener el IGM_o se requiere un análisis factorial de segundo orden, que es el resultado de los FM o variables latentes de primer orden. Los modelos de segundo orden son comúnmente aplicables en contextos de investigación en los cuales los instrumentos de

⁷ IGM_o : Índice global de madurez obtenido en la escala original a partir de las ecuaciones obtenidas para los ILM.

medición evalúan varias construcciones relacionadas; en este caso, la madurez se mide a través de los diferentes FM.

El modelo de segundo orden representa la hipótesis que “los constructos, aparentemente distintos, están relacionados y se explican por uno o más constructos comunes de orden superior subyacentes” (Zainudin, 2012, p. 163). En comparación con los modelos de primer orden con factores correlacionados, los modelos de segundo orden pueden proporcionar un modelo con altos niveles de ajuste para cada coeficiente o parámetro estimado. Se trata de un modelo más parsimonioso (Salgado, 2009) e interpretable, ya que este factor de orden superior es desarrollado con base en los datos recopilados.

Una variable latente de segundo orden se puede conceptualizar como factores múltiples en un análisis factorial exploratorio que no son particularmente ortogonales. Idealmente, cuando se suman los elementos en cada uno de estos factores, el análisis factorial exploratorio resultante de los elementos analizados es unidimensional. Su representación se realiza en diagramas donde las flechas van desde el IGM hacia los FM, indicando que están correlacionados, no son independientes, esto corresponde a una relación reflectiva. En la figura 5.1 se presenta la construcción del IGM₀, y en la tabla 5.2, los valores de las cargas factoriales para cada uno de los ILM con los que se construye dicho índice global.

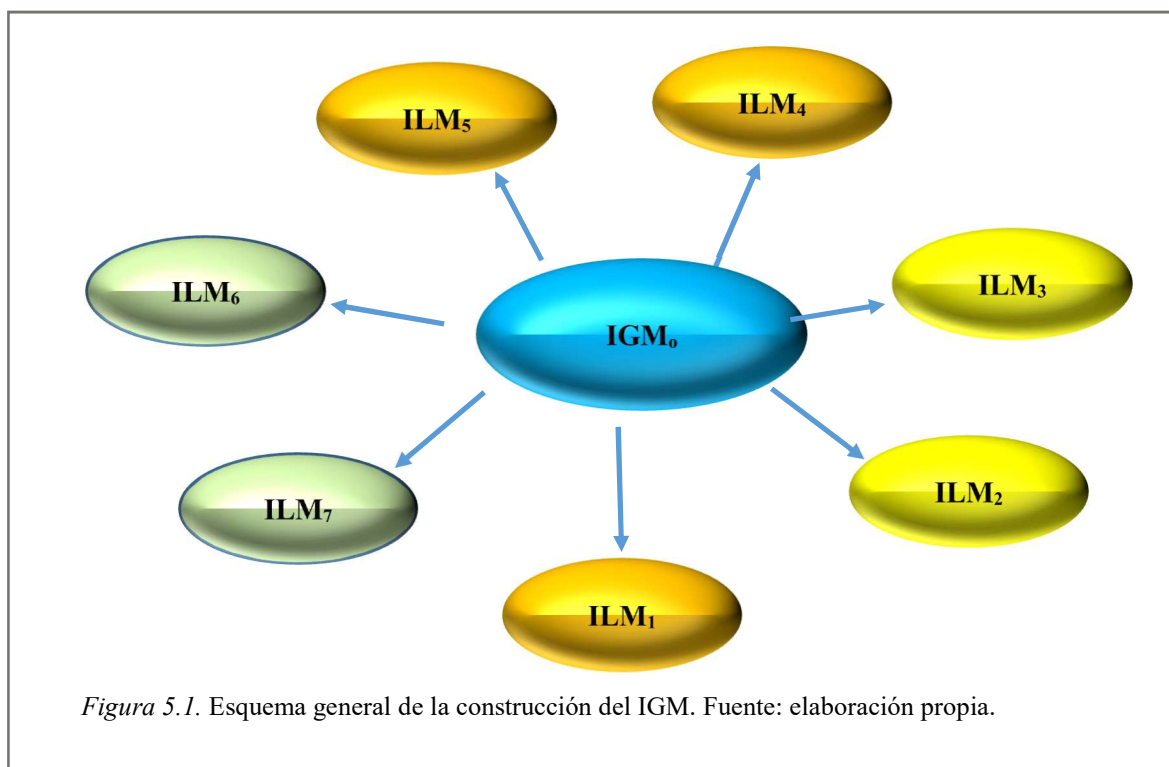


Tabla 5.2 Cargas factoriales de los factores de madurez que componen el índice global de madurez

Factor de madurez		Carga factorial	Carga factorial transformada
CommTM	Y ₁	0,797	0,154
LeaderSh	Y ₂	0,697	0,134
TeamWork	Y ₃	0,631	0,122
WorkEnv	Y ₄	0,735	0,142
SupporOp	Y ₅	0,782	0,151
SPImprov	Y ₆	0,687	0,132
ProImpr	Y ₇	0,857	0,165

Fuente: elaboración propia.

Autores como Dwyer y Oh (1987) sugieren que se puede usar una variable latente de segundo orden para combinar efectivamente varias variables latentes de primer orden y así simplificar un modelo en SEM. En su trabajo, Anderson y Gerbing (1984) y Rindskopf y Rose (1988) también sugieren que el principal uso de un modelo de segundo orden es simplificar un modelo combinando variables latentes de primer orden en una sola variable latente de segundo orden, lo cual es conveniente para explicar el fenómeno principal. Para entender un fenómeno como la madurez de LC en la GPC, conviene conocer el comportamiento de los FM de manera individual para entender su impacto en la madurez global.

El SEM permite aprovechar el uso de las regresiones entre elementos del modelo, una cualidad que provee al modelo el análisis multivariado. Respecto de este uso, Dwyer y Oh (1987) explican que una variable latente de segundo orden, el IGM_o, “impulsa” a sus variables latentes de primer orden, los FM, los cuales “controlan” sus variables observadas, los atributos. De esta manera, el modelo permite identificar la influencia que cada atributo tiene en la obtención del IGM_o.

Así que, una vez se conoce el IGM, el tomador de decisiones establece un IGM objetivo, el cual puede ser alcanzado con base en diferentes combinaciones de los 35 atributos del modelo, a partir de la madurez de cada atributo evaluado. El tomador de decisiones selecciona la configuración que más convenga a la organización respecto de estas

combinaciones, esto define el plan de evolución. Con el IGM objetivo se desciende en la jerarquía del modelo para identificar los valores para cada ILM y los niveles de madurez en cada atributo que corresponden de la manera más eficiente, según las condiciones de la organización.

5.2.2 Validación del modelo de segundo orden

Esta investigación dispone de un modelo robusto, de acuerdo con los indicadores de ajustes del modelo de segundo orden presentado en la figura 5.2, lo cual permite afirmar que el IGM representa el proceso de madurez de LC en la GPC de manera muy precisa.

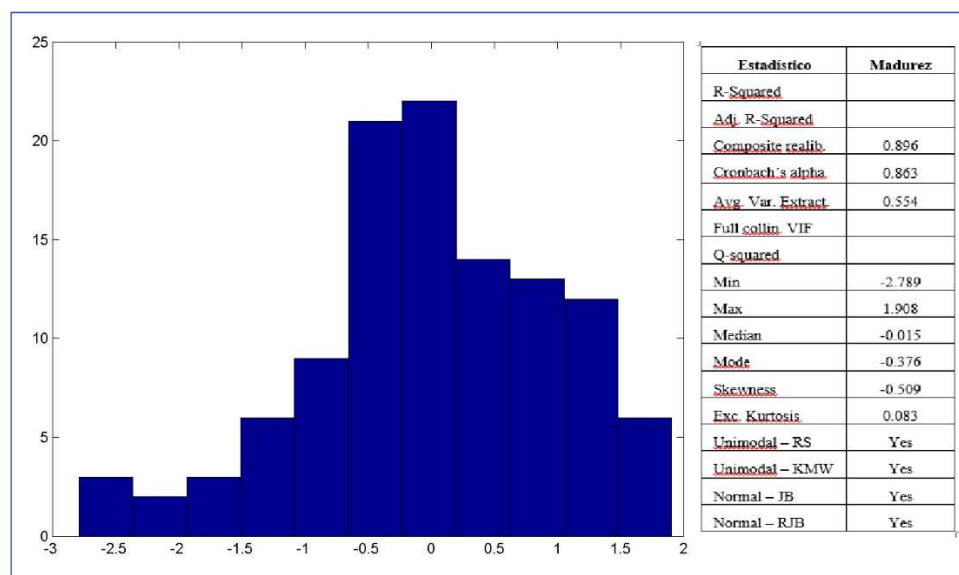


Figura 5.2. Indicadores de ajuste del SEM de segundo orden. Fuente: elaboración propia.

El alfa de Cronbach muestra que los FM están correlacionados de manera adecuada; este indicador es válido cuando es superior o igual a 0,7. En este sentido, explica que no se presentan FM que estén midiendo la misma condición de madurez, por lo que cada FM mide su madurez de manera precisa. La varianza promedio extraída (AVE) explica la madurez en este valor, 55,4 %, lo cual, para este tipo de investigaciones con valores por encima del 20 %, es un buen indicador del desempeño del modelo. La figura 5.2 muestra la manera como se

distribuye la información que compone el IGM con una asimetría de -0,509 que explica que la distribución de la minoría de los datos está en la parte izquierda de la media, y la curtosis con 0,083 que explica una distribución platicúrtica de datos. Este indicador muestra una baja concentración de datos en la región central de la distribución sin que esto implique una menor varianza.

5.2.3 Herramienta de Calificación de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de Producción Proyectos de Construcción (SLC-QT)

La Herramienta de Calificación de la Madurez de LC en la GPC (SLC-QT) se utiliza para identificar el nivel de madurez que alcanza la GPC. Se desarrolla a partir de las ecuaciones del SEM con la ayuda de un modelo estadístico (Anexo 5.1), con el cual se obtienen las ecuaciones en las que se introduce la evaluación de madurez de los atributos para calcular el valor de los ILM y el IGM_o. El nivel de madurez de los atributos se evalúa en campo con ayuda de un estándar, o herramienta de evaluación prevista para tal fin, de tal manera que al multiplicar cada atributo por su carga factorial entrega una calificación para el FM. La calificación para cada FM así obtenida tendrá valores en diferentes escalas, lo cual no ofrece un resultado consistente, por lo que es necesario el desarrollo de un modelo estadístico con el cual se busca que cada FM se halle en la misma escala de calificación. Para calcular los ILM y el IGM se ha desarrollado una aplicación en una hoja de cálculo con la que se obtiene la información base de análisis para proponer la estrategia de evolución (Anexo 5.2).

5.2.3.1 Cálculo de los índices locales de madurez (ILM)

En el proceso de producción de proyectos de construcción, la madurez corresponde a un concepto que no se puede medir directamente desde el punto de vista metodológico, de modo que, como característica medible, puede ser evaluada a través de una variable latente, el IGM_o, que se aproxima como una variable sintética. De acuerdo con Silva (1997), una variable sintética es una función de un conjunto de variables intermedias, los FM, donde cada una contribuye a cuantificar algún rasgo del concepto cuya magnitud quiere sintetizarse. La expresión numérica de la madurez de LC en la GPC puede ser modelizada mediante una escala construida a partir de la medición de las siete variables latentes o FM del SEM. Estos FM son medidos mediante una serie de atributos. Los FM son:

- Compromiso de la Alta Dirección
- Liderazgo Lean
- Trabajo en Equipo
- Ambiente de Trabajo
- Soporte Operativo a la Producción
- Mejoramiento del Sistema de Producción
- Mejoramiento de la Producción

Una vez seleccionado el índice más apropiado, según el modelo estadístico presentado en el Anexo 5.1, se obtienen las ecuaciones para cada uno de los ILM y para el IGM_o. Las ecuaciones de los ILM incluyen los efectos de los atributos que los explican y los efectos debidos a las relaciones de los FM de los que dependen.

En este aparte se presenta el desarrollo de las ecuaciones, y más adelante, por medio de un ejemplo, se simula una calificación factible, de acuerdo con la información estadística obtenida, para una evaluación de atributos. Con estos resultados se obtienen los ILM, el IGM_o—que luego se transforma a la escala entre 1 y 5— y el perfil de la evaluación. Este ejemplo se continúa en la siguiente sección para explicar cómo se desarrolla la estrategia de evolución.

5.2.3.2 Índices locales de madurez (ILM)

Un ILM_i representa el nivel de madurez alcanzado por el FM, al considerar las relaciones directas que recibe de los FM con los cuales está asociado directamente. Estos índices consideran las relaciones directas e indirectas entre los FM. En estas ecuaciones, la primera parte de la expresión corresponde a la contribución a la madurez del FM de sus respectivos atributos (x_j), y la segunda parte corresponde a la relación directa e indirecta de otros FM.

- ***Índice de madurez del factor Compromiso de la Alta Dirección (ILM₁)***

El ILM₁ es el indicador de madurez del factor Compromiso de la Alta Dirección. En el SEM, este factor ha sido mencionado como CommTM a lo largo de esta investigación, y corresponde al FM independiente Y₁. Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que lo explican, estos son:

X₉: Apoyo continuo para el desarrollo de un Sistema de Producción Lean Construction.

X₁₀: Definición y despliegue de la política y la estrategia para apoyar la construcción Lean.

X₁₁: Enfoque en la filosofía.

X₁₂: Resultados del negocio.

$$ILM_1 = Y_{CommTM} = Y_1 = 0,277 * x_9 + 0,278 * x_{10} + 0,240 * x_{11} + 0,205 * x_{12}$$

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X₉, X₁₀, X₁₁, X₁₂. No recibe influencia de ningún otro FM, este es el factor de madurez independiente. El resultado corresponde al IML para el factor de madurez Compromiso de la Alta Dirección.

- ***Índice de madurez del factor Liderazgo Lean (ILM₂)***

El ILM₂ es el indicador de madurez del factor Liderazgo Lean. En el SEM, este factor ha sido mencionado como LeaderSh, y corresponde al FM dependiente Y₂. Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor, estos son:

X₁₉: Formación en la filosofía LC.

X₂₀: Cultura Lean.

X₂₁: Crecimiento y desarrollo de líderes Lean.

X₂₂: Valores y visión personal.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X₁₉, X₂₀, X₂₁, X₂₂ y de la influencia que recibe del ILM₁ (CommTM). El resultado corresponde al IML para el factor de madurez Liderazgo Lean.

$$ILM_2 = Y_{LeaderSh} = Y_2 = (0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22}) + (0,104 * ILM_1)$$

Donde,

$$ILM_1 = 0,277 * x_9 + 0,278 * x_{10} + 0,240 * x_{11} + 0,205 * x_{12}$$

- ***Índice de madurez del factor Trabajo en equipo (ILM₃)***

El ILM₃ es el indicador de madurez del factor Trabajo en equipo. En el SEM, este factor ha sido mencionado como TeamWork, y corresponde al FM dependiente Y₃. Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor, estos son:

X₁: Procesos de trabajo en equipo.

X₂: Solución de problemas y aprendizaje continuo.

X₃: Desarrollo de los equipos de trabajo.

X₄: Promoción de la mejora continua.

X₅: Promoción y desarrollo de Lean Construction.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X₁, X₂, X₃, X₄ y X₅ y de la influencia que recibe del ILM₁ y el ILM₂ (CommTM y LeaderSh). El resultado corresponde al IML para Trabajo en equipo.

$$ILM_3 = Y_{TeamWork} = Y_3 = (0,192 * x_1 + 0,206 * x_2 + 0,213 * x_3 + 0,198 * x_4 + 0,191 * x_5) \\ + (0,095 * ILM_1 + 0,059 * ILM_2)$$

Donde,

$$ILM_1 = 0,277 * x_9 + 0,278 * x_{10} + 0,240 * x_{11} + 0,205 * x_{12} \\ ILM_2 = 0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22} + 0,104 * ILM_1$$

- ***Índice de madurez del factor Ambiente de trabajo (ILM₄)***

El ILM₄ es el indicador de madurez del factor Ambiente de trabajo. En el SEM, este factor ha sido mencionado como WorkEnv y corresponde al FM dependiente Y₄. Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor, estos son:

X₆: Participación de las personas en la construcción del ambiente de trabajo.

X₇: Interacción en el entorno de trabajo.

X₈: Aprendizaje y entrenamiento para la seguridad en el sitio de trabajo.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X₆, X₇ y X₈, y de la influencia que recibe del ILM₂ y el ILM₃ (LeaderSh y TeamWork). El resultado corresponde al IML para Ambiente de trabajo.

$$ILM_4 = Y_{WorkEnv} = Y_4 = (0,337 * x_6 + 0,332 * x_7 + 0,331 * x_8) + (0,087 * ILM_2 + 0,056 * ILM_3)$$

Donde,

$$ILM_3 = 0,192 * x_1 + 0,206 * x_2 + 0,213 * x_3 + 0,198 * x_4 + 0,191 * x_5 + (0,095 * ILM_1 + 0,059 * ILM_2)$$

$$ILM_2 = 0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22} + 0,104 * ILM_1$$

- ***Índice de madurez del factor Soporte Operativo de la Producción (ILM₅)***

El ILM₅ es el indicador de madurez del factor Soporte Operativo de la Producción. En el SEM, este factor ha sido mencionado como SupporOp y corresponde al FM dependiente Y₅. Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor, estos son:

X₁₃: Sistemas de información.

X₁₄: Operaciones logísticas.

X₁₅: Proceso de gestión contractual.

X₁₆: Implementación de un sistema de gestión.

X₁₇: Gestión del conocimiento.

X₁₈: Apoyo al proyecto con los procesos de organización.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X₁₃, X₁₄, X₁₅, X₁₆, X₁₇, y X₁₈, y de la influencia que recibe del ILM₁, el ILM₂ y el ILM₄ (CommTM, LeaderSh y TeamWork). El resultado corresponde al IML para Soporte Operativo de la Producción.

$$\begin{aligned}
ILML_5 &= Y_{SupportOp} = Y_5 \\
&= (0,160 * x_{13} + 0,180 * x_{14} + 0,171 * x_{15} + 0,161 * x_{16} + 0,184 * x_{17} + 0,144 * x_{18}) \\
&\quad + (0,136 * ILM_1 + 0,059 * ILM_2 + 0,072 * ILM_4)
\end{aligned}$$

Donde,

$$\begin{aligned}
ILM_1 &= 0,277 * x_9 + 0,278 * x_{10} + 0,240 * x_{11} + 0,205 * x_{12} \\
ILM_2 &= 0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22} + 0,104 * ILM_1 \\
ILM_4 &= 0,337 * x_6 + 0,332 * x_7 + 0,331 * x_8 + 0,056 * ILM_3 + 0,087 * ILM_2
\end{aligned}$$

- ***Índice de madurez del factor Mejoramiento del sistema de producción (ILM₆)***

El ILM₆ es el indicador de madurez del factor Mejoramiento del sistema de producción. En el SEM, este factor ha sido mencionado como SPImprov y corresponde al FM dependiente Y₆. Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor, estos son:

X₂₃: Flexibilidad.

X₂₄: Reducción del tiempo de ciclo.

X₂₅: Reducción de la variabilidad.

X₂₆: Control del proceso completo.

X₂₇: Simplificación de procesos.

X₂₈: Transparencia.

X₂₉: *Benchmarking*.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X₂₃, X₂₄, X₂₅, X₂₆, X₂₇, X₂₈ y X₂₉, y de la influencia que recibe del ILM₂ y el ILM₅ (LeaderSh y SupportOp). El resultado corresponde al IML para Mejoramiento del sistema de producción.

$$\begin{aligned}
ILM_6 &= Y_{SPImprov} = Y_6 \\
&= (0,157 * x_{23} + 0,152 * x_{24} + 0,152 * x_{25} + 0,148 * x_{26} + 0,143 * x_{27} + 0,134 * x_{28} + 0,114 * x_{29}) \\
&\quad + (0,030 * ILM_2 + 0,121 * ILM_5)
\end{aligned}$$

Donde,

$$ILM_2 = 0,268 * x_{19} + 0,266 * x_{20} + 0,253 * x_{21} + 0,214 * x_{22} + 0,104 * ILM_1$$

$$ILM_5 = 0,160 * x_{13} + 0,180 * x_{14} + 0,171 * x_{15} + 0,161 * x_{16} + 0,184 * x_{17} + 0,144 * x_{18} + 0,059 * ILM_2 + 0,072 * ILM_4 + 0,136 * ILM_1$$

- ***Índice de madurez del factor Mejoramiento de la producción (ILM₇)***

El ILM₇ es el indicador de madurez del factor Mejoramiento de la producción. En el SEM, este factor ha sido mencionado como ProImpr y corresponde al factor más dependiente de todos, Y₇. Este factor recibe todos los efectos de los otros factores de madurez. Para este factor, su madurez se configura a partir de la madurez de los atributos que explican el factor, estos son:

X₃₀: Desarrollo de estándares.

X₃₁: Conocimiento y selección de herramientas Lean Construction.

X₃₂: Flujo continuo.

X₃₃: Cumplimiento de la oferta de valor.

X₃₄: Desarrollo de un sistema *pull*.

X₃₅: Mejoramiento continuo.

La madurez del factor se obtiene de la contribución de la madurez de los atributos que lo componen X₃₀, X₃₁, X₃₂, X₃₃, X₃₄ y X₃₅, y de la influencia que recibe del ILM₃, el ILM₅ y el ILM₆ (TeamWork, SupporOp y SPImprov). El resultado corresponde al IML para Mejoramiento de la producción.

$$\begin{aligned} ILM_7 &= Y_{ProImpro} = Y_7 \\ &= (0,175 * x_{30} + 0,170 * x_{31} + 0,169 * x_{32} + 0,168 * x_{33} + 0,161 * x_{34} + 0,157 * x_{35}) \\ &\quad + (0,050 * ILM_3 + 0,072 * ILM_5 + 0,059 * ILM_6) \end{aligned}$$

Donde,

$$ILM_3 = 0,192 * x_1 + 0,206 * x_2 + 0,213 * x_3 + 0,198 * x_4 + 0,191 * x_5 + (0,095 * ILM_1 + 0,059 * ILM_2)$$

$$ILM_5 = 0,160 * x_{13} + 0,180 * x_{14} + 0,171 * x_{15} + 0,161 * x_{16} + 0,184 * x_{17} + 0,144 * x_{18} + 0,059 \\ * ILM_2 + 0,072 * ILM_4 + 0,136 * ILM_1$$

$$ILM_6 = (0,157 * x_{23} + 0,152 * x_{24} + 0,152 * x_{25} + 0,148 * x_{26} + 0,143 * x_{27} + 0,134 * x_{28} + 0,114 \\ * x_{29}) + (0,030 * ILM_2 + 0,121 * ILM_5)$$

Con estos ILM se construye el IGM. La obtención de este índice se explica a continuación.

5.2.3.3 Cálculo del índice global de madurez (IGM)

Un IGM representa el nivel de madurez alcanzado por el proceso de gestión de producción de proyectos de construcción al implementar LC. Este indicador se construye a partir de los ILM. A continuación, se presenta la formulación del IGM de acuerdo con su desarrollo a partir del SEM de segundo orden, como se explicó al inicio de esta sección. En el aparte 5.1.1 se presentan las cargas factoriales correspondientes al SEM de segundo orden con el cual se calcula el IGM. Estas cargas factoriales también han sido objeto de transformación con ayuda del Modelo Estadístico. Las cargas factoriales se convierten en los coeficientes del IGM, los cuales se presentan en la tabla 5.3.

Tabla 5.3. Cargas factoriales de los factores de madurez que componen el índice global de madurez (IGM)

Factor de madurez		Carga factorial	Carga factorial normalizada	Contribución al IGM (%)
CommTM	Y ₁	0,797	0,154	15,40
LeaderSh	Y ₂	0,697	0,134	13,40
TeamWork	Y ₃	0,631	0,122	12,20
WorkEnv	Y ₄	0,735	0,142	14,20
SupporOp	Y ₅	0,782	0,151	15,10
SPImprov	Y ₆	0,687	0,132	13,20
ProImpr	Y ₇	0,857	0,165	16,50

Fuente: elaboración propia.

Con los aportes de cada uno de los FM se construye el IGM_o. Se denomina IGM_o debido a que los resultados se obtienen en la escala original de calificación dada por la ecuación a continuación:

Índice global de madurez (IGM₀) de LC en la GPC

$$\text{IGM}_0 = 0,154 * \text{ILM}_1 + 0,134 * \text{ILM}_2 + 0,122 * \text{ILM}_3 + 0,142 * \text{ILM}_4 + 0,151 * \text{ILM}_5 \\ + 0,132 * \text{ILM}_6 + 0,165 * \text{ILM}_7$$

5.2.3.4 Ajuste del índice por escala

De acuerdo con el modelo estadístico, el IGM₀ toma valores en un rango entre 1,161 y 5,804, estos son los valores mínimos y máximo que puede tomar el índice. Estos valores corresponden respectivamente a un nivel de madurez 1 para todos los atributos evaluados con un alcance de madurez igual a 1, y a un nivel de madurez 5 para todos los atributos evaluados con un alcance de madurez igual a 5. Para niveles de madurez intermedios 2, 3 y 4, que se presentan como niveles de referencia con los que identifican más adelante los perfiles de referencia del nivel de madurez, se obtienen los valores mostrados en la tabla 5.4.

Se hace necesario realizar un cambio de la escala del resultado final del IGM₀, o índice global de madurez en su escala original, a una escala que se encuentre en un rango entre 1 y 5, para un mejor entendimiento por parte del usuario del modelo respecto del nivel de madurez obtenido. Este índice es identificado como IGM₍₁₋₅₎, el cual para esta investigación se denomina IGM. Para esta transformación, primero se cambia la escala del índice entre 0 y 1, y después se cambia la escala entre 1 y 5 con las ecuaciones a continuación:

$$I_{(0-1)} = \frac{IGM_0 - 1,161}{5,804 - 1,161}$$
$$I_{(1-5)} = \frac{[I_{(0-1)} - 0] * [5 - 1]}{[1 - 0]} + 1$$

Tabla 5.4 Índices locales de madurez de referencia para niveles de madurez entre 1 y 5

Nivel de madurez de referencia	ILM ₁	ILM ₂	ILM ₃	ILM ₄	ILM ₅	ILM ₆	ILM ₇	IGM ₀	IGM ₍₁₋₅₎
1	1,000	1,105	1,160	1,161	1,285	1,189	1,221	1,161	1,000
2	2,000	2,210	2,320	2,322	2,570	2,377	2,441	2,322	2,000
3	3,000	3,315	3,481	3,483	3,854	3,566	3,662	3,482	3,000
4	4,000	4,420	4,461	4,644	5,139	4,754	4,883	4,643	4,000
5	5,000	5,525	5,801	5,806	6,424	5,943	6,103	5,804	5,000

Fuente: elaboración propia.

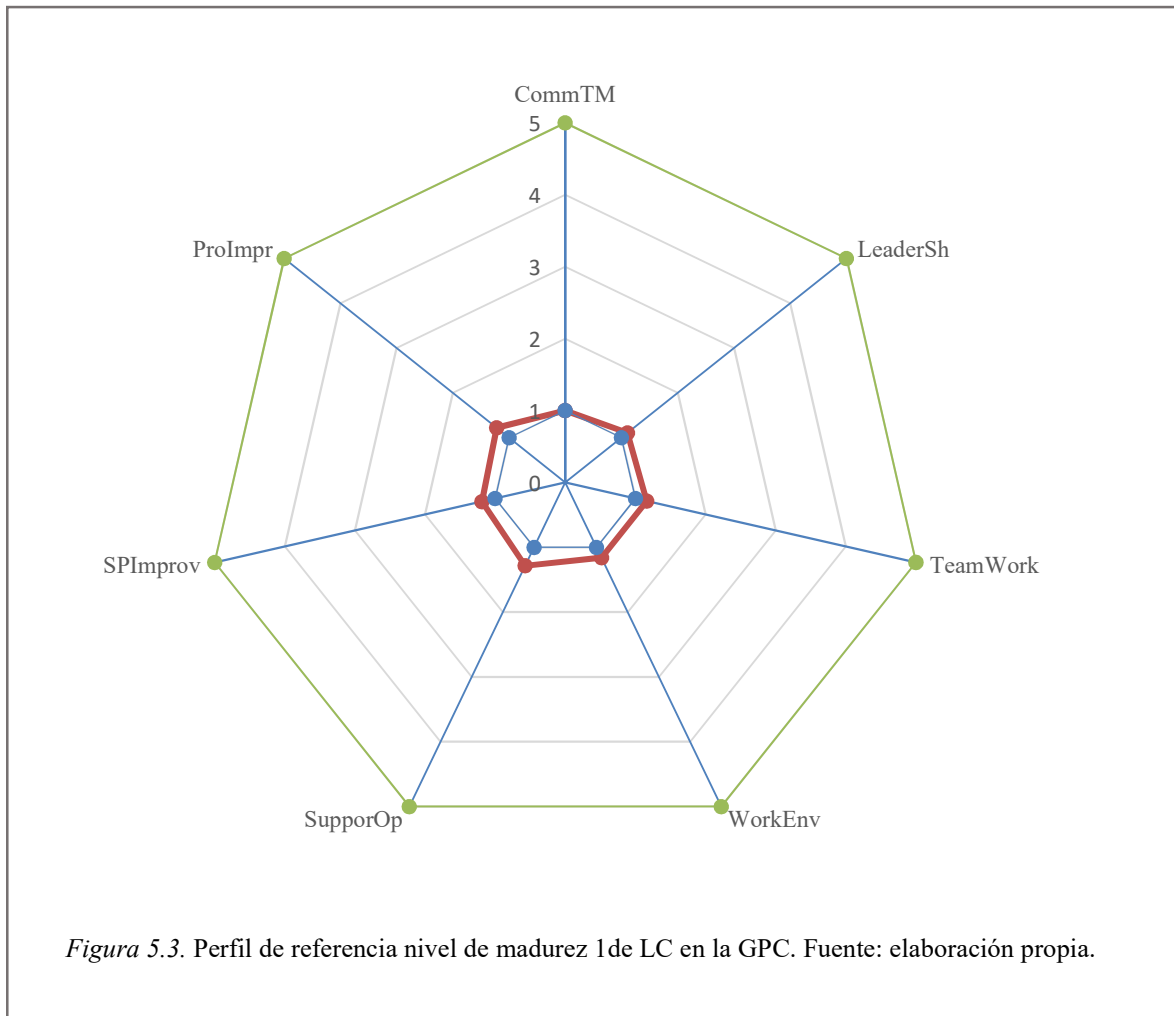
5.2.4 Perfiles de madurez

Con los ILM se obtiene el perfil de madurez de la evaluación, que es la interpretación conjunta de los ILM, y se visualizan por medio de diagramas de radar. También se hace necesario disponer de los perfiles de referencia, los cuales corresponden a los ILM de referencia. Estos perfiles de referencia son útiles para establecer la cercanía de una evaluación de madurez con alguno de ellos y así concebir una adecuada estrategia de avance hacia el siguiente nivel. Con el SLC-EModel se identifica la madurez y se toman decisiones respecto de la manera de avanzar hacia el siguiente nivel de madurez, esto corresponde a la estrategia de evolución que se presenta más adelante. A continuación, se presentan los perfiles de madurez de referencia.

5.2.4.1 Perfil de referencia del nivel de madurez 1

Los 35 atributos se evalúan en nivel 1 de madurez. La configuración del perfil de referencia del nivel de madurez 1 corresponde al perfil identificado con el color rojo de la figura 5.3. Nótese que este perfil no se ciñe a uno donde todas las calificaciones en el radar son 1. Esto se debe a la naturaleza sistémica del modelo y la manera como los FM *causa* impactan en los FM *efecto*. Así, el nivel de madurez 1 alcanzado por el FM dependiente es el resultado de un “empuje” provisto por el FM del que recibe efecto de acuerdo con el modelo de relaciones obtenido en el Capítulo 4.

Para este y todos los perfiles de madurez obtenidos con el modelo de madurez, el FM CommTM es el factor independiente del modelo, a la vez que es el FM más influyente, como se vio en el Capítulo 4. El perfil 1 se obtiene evaluando todos los atributos que explican el factor CommTM, con un nivel de madurez 1. De esta manera, el FM califica con un nivel de madurez 1, lo cual es consistente con el hecho de que las evaluaciones para los atributos sean 1. A partir de la calificación de cada FM y el efecto de cada uno de ellos en el modelo, se obtienen las calificaciones para los otros FM. En la figura 5.3 se aprecia el perfil de referencia nivel de madurez 1.



5.2.4.2 Perfiles de referencia de los niveles de madurez del 2 al 5

Todos los perfiles guardan proporción entre ellos dada su construcción a partir de las ecuaciones para los ILM. Una vez agrupados los cinco perfiles de referencia, se obtiene un referente para entender el nivel de madurez de LC en la GPC. En la figura 5.4 se muestran los cinco perfiles de referencia de la evaluación de la madurez de LC en la GPC.

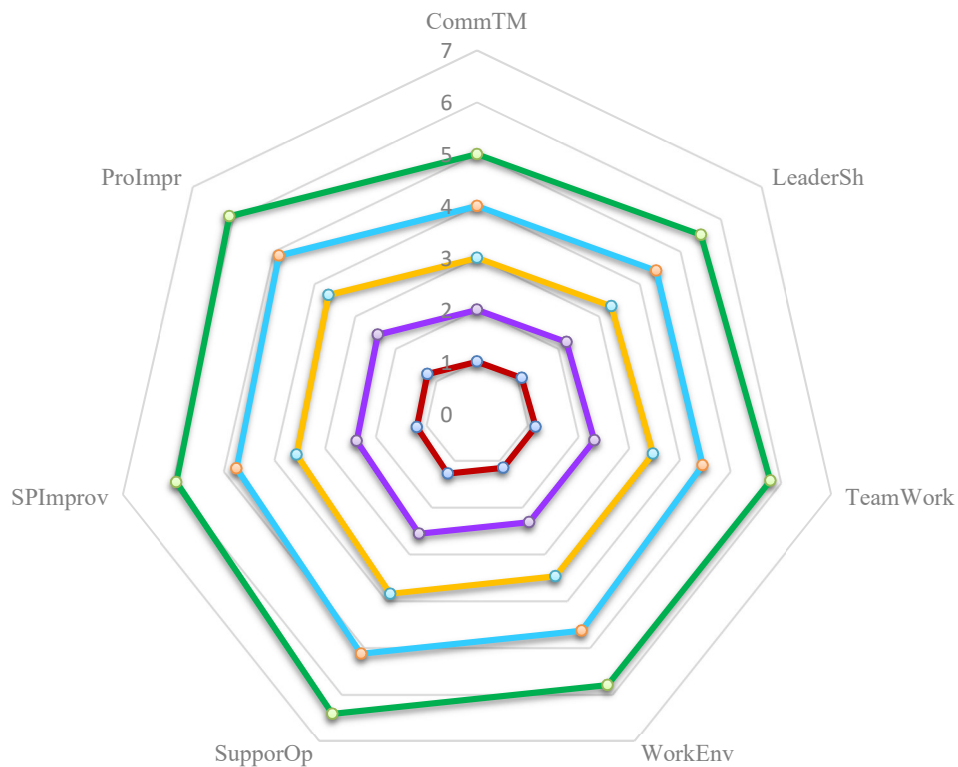


Figura 5.4. Perfiles de referencia nivel de madurez del 1 al 5 de LC en la GPC. Fuente: elaboración propia.

5.2.5 Herramienta de Evaluación de la Madurez de los Atributos de LC en la GPC (SLC-MAET)

La Herramienta de Calificación de Madurez (SLC-QT) requiere la evaluación de los 35 atributos del modelo. Esta evaluación se obtiene en campo, para cada uno de los atributos, con ayuda de la Herramienta de Evaluación de Madurez de los Atributos (SLC-MAET), que evalúa el alcance de madurez de cada atributo según un estándar que especifica las características de madurez en cada nivel previsto. Este estándar reduce la subjetividad de una evaluación del atributo prescribiendo su alcance entre cinco niveles de madurez.

El desarrollo de la SLC-MAET no es del alcance de esta investigación, por lo cual se propone como una investigación futura que se explica en detalle en el aparte correspondiente de esta tesis. Sin embargo, el presente desarrollo del SLC-EModel considera la importancia y el efecto de cada atributo en la consecución de la madurez. A continuación, y por medio de un ejemplo, se presenta el uso del SLC-EModel y se aborda la evaluación y calificación de madurez. Más adelante, en la sección 5.3.4.2, a partir de los resultados se desarrolla la estrategia de evolución.

5.2.6 Ejemplo de aplicación del Modelo de Madurez (SLC-MM)

Para el desarrollo del ejemplo, se supone una evaluación en campo, con la cual se identifica el nivel de madurez de LC en la GPC para un caso particular. Primero se hace uso de la SLC-MAET, cuyos resultados se reportan en la tabla 5.5. En esta tabla también se relacionan en la cuarta columna la importancia de cada atributo en la conformación de cada FM. Esta importancia debe leerse de manera independiente por cada FM, los cuales son utilizados para construir la herramienta de calificación (SLC-QT).

Tabla 5.5. Resultados de la evaluación en campo de LC en la GPC (ejemplo)

Reporte SLC-MAET					
Factor de madurez	Atributo	Identificación del atributo	Peso del atributo por FM (Transformado)	Resultados de la evaluación SLC-MAET	Resultados de la selección SLC-ES MAET
TeamWork	LL2	X1	0,192	1	2
	PS2	X2	0,206	2	3
	TW2	X3	0,213	1	2
	TW1	X4	0,198	2	2
	LL3	X5	0,191	1	1
WorkEnv	WE1	X6	0,337	1	2
	WE2	X7	0,332	1	1
	WS2	X8	0,331	2	2
CommTM	HMC1	X9	0,277	2	3
	HMC2	X10	0,278	1	2
	HMC3	X11	0,24	1	2
	IBP1	X12	0,205	1	1
SupporOp	INN2	X13	0,16	2	3
	SCLO2	X14	0,18	3	3
	IBP4	X15	0,171	1	2
	IBP3	X16	0,161	1	2
	CIF1	X17	0,184	1	2
	IBP2	X18	0,144	1	1
LeaderSh	LDC2	X19	0,268	1	2
	A1	X20	0,266	1	2
	LL1	X21	0,253	1	2
	A2	X22	0,214	2	3
SPIImprov	PIM2	X23	0,157	1	2
	WI4	X24	0,152	1	1
	WI3	X25	0,152	1	1
	FC3	X26	0,148	1	2
	PIM1	X27	0,143	1	2
	PIM3	X28	0,134	1	1
	PIM4	X29	0,114	1	2
ProImpr	WPS1	X30	0,175	2	3
	TU1	X31	0,17	1	2
	WI1	X32	0,169	2	3
	FC1	X33	0,168	2	2
	PPC2	X34	0,161	1	1
	FC2	X35	0,157	1	2

Fuente: elaboración propia.

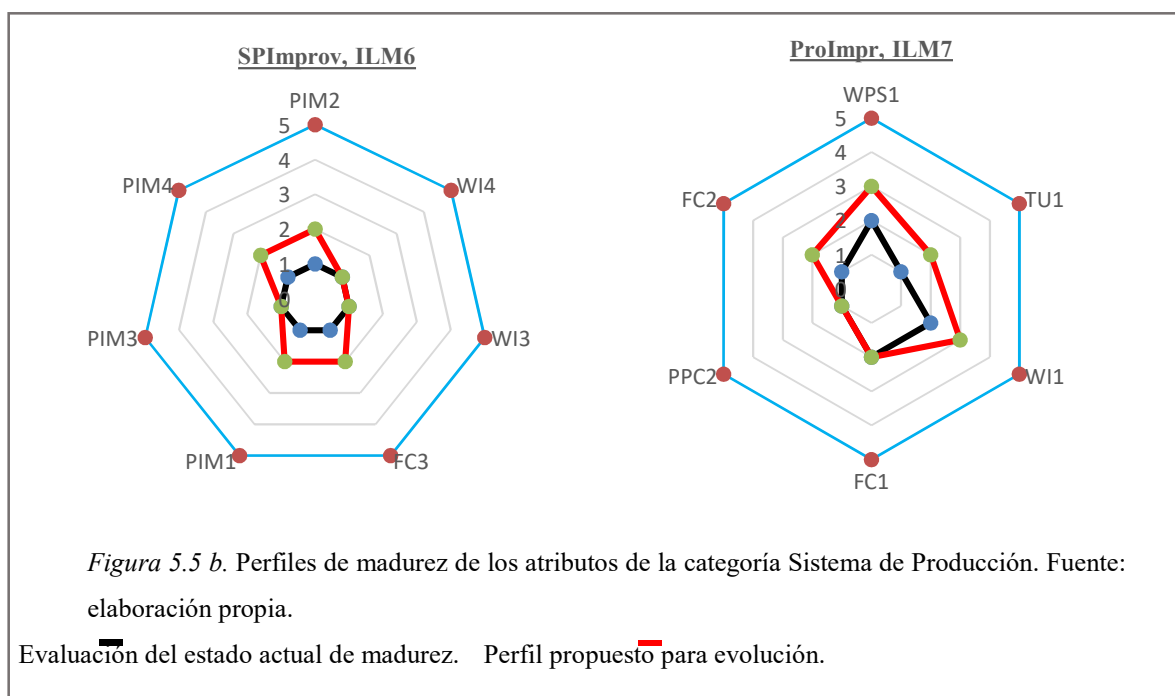
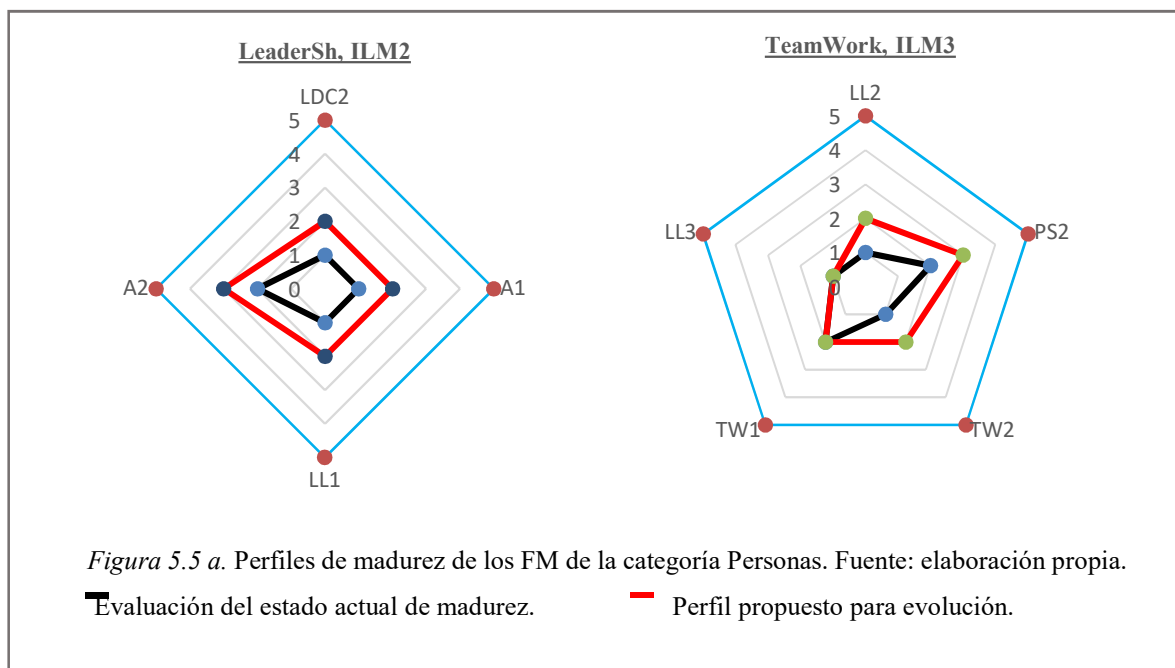
La evaluación obtenida para los 35 atributos se ingresa al SLC-QT y se obtienen los ILM que se presentan en la tabla 5.6. En el Anexo 5.2 se pueden consultar los cálculos de acuerdo con la aplicación desarrollada en Excel e identificada como Aplicación SLC-EModel.

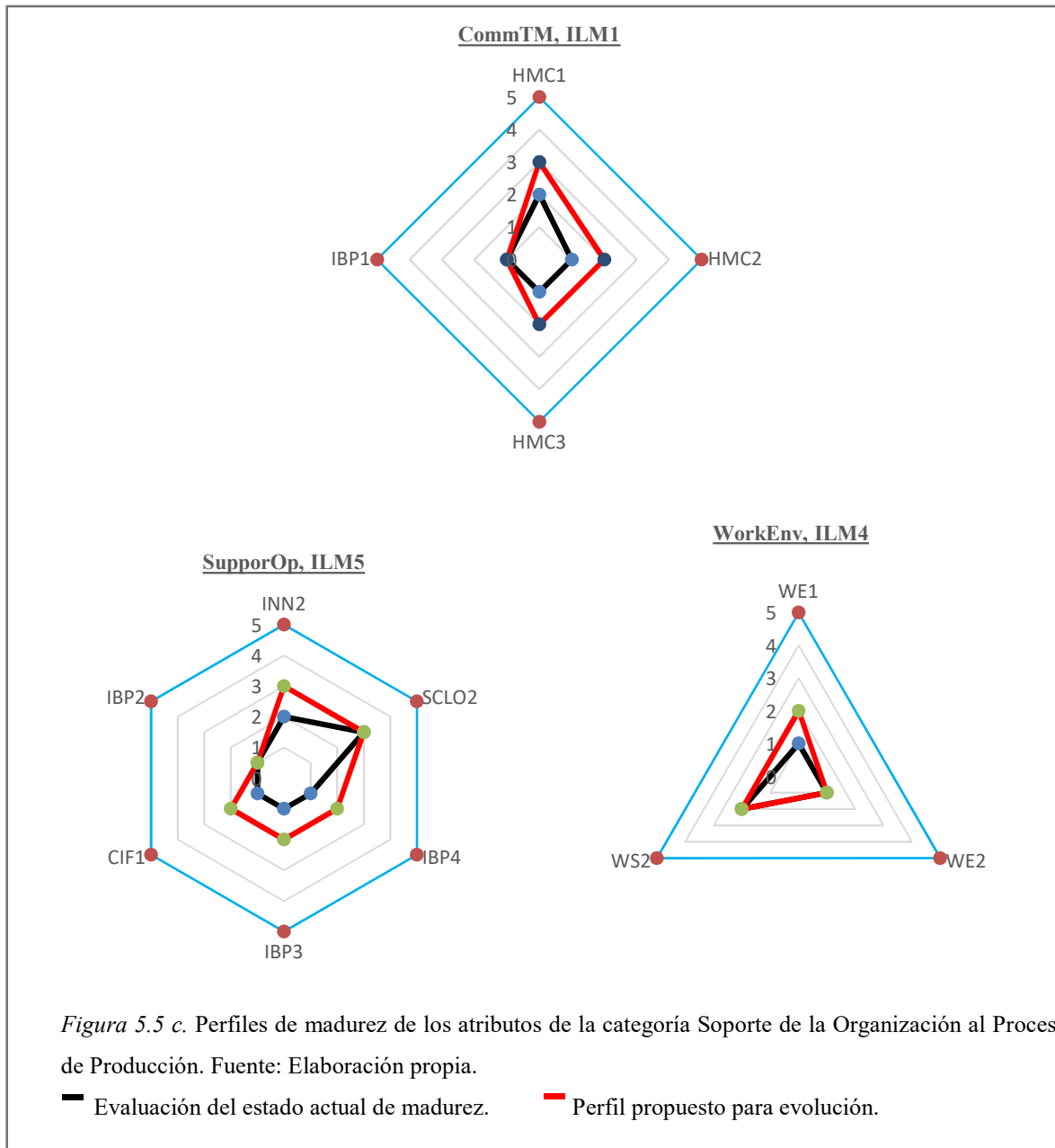
Tabla 5.6. Índices locales de madurez de LC en la GPC (ejemplo)

ÍNDICES LOCALES DE MADUREZ			
Compromiso de la Alta Dirección	CommTM	IML 1	1,277
Liderazgo Lean	LeaderSh	IML 2	1,348
Trabajo en Equipo	TeamWork	IML 3	1,605
Ambiente de Trabajo	WorkEnv	IML 4	1,538
Soporte Operativo a la Producción	SupporOp	IML 5	1,884
Mejoramiento del Sistema de Producción	SPImprov	IML 6	1,268
Mejoramiento de la Producción	ProImpr	IML 7	1,803

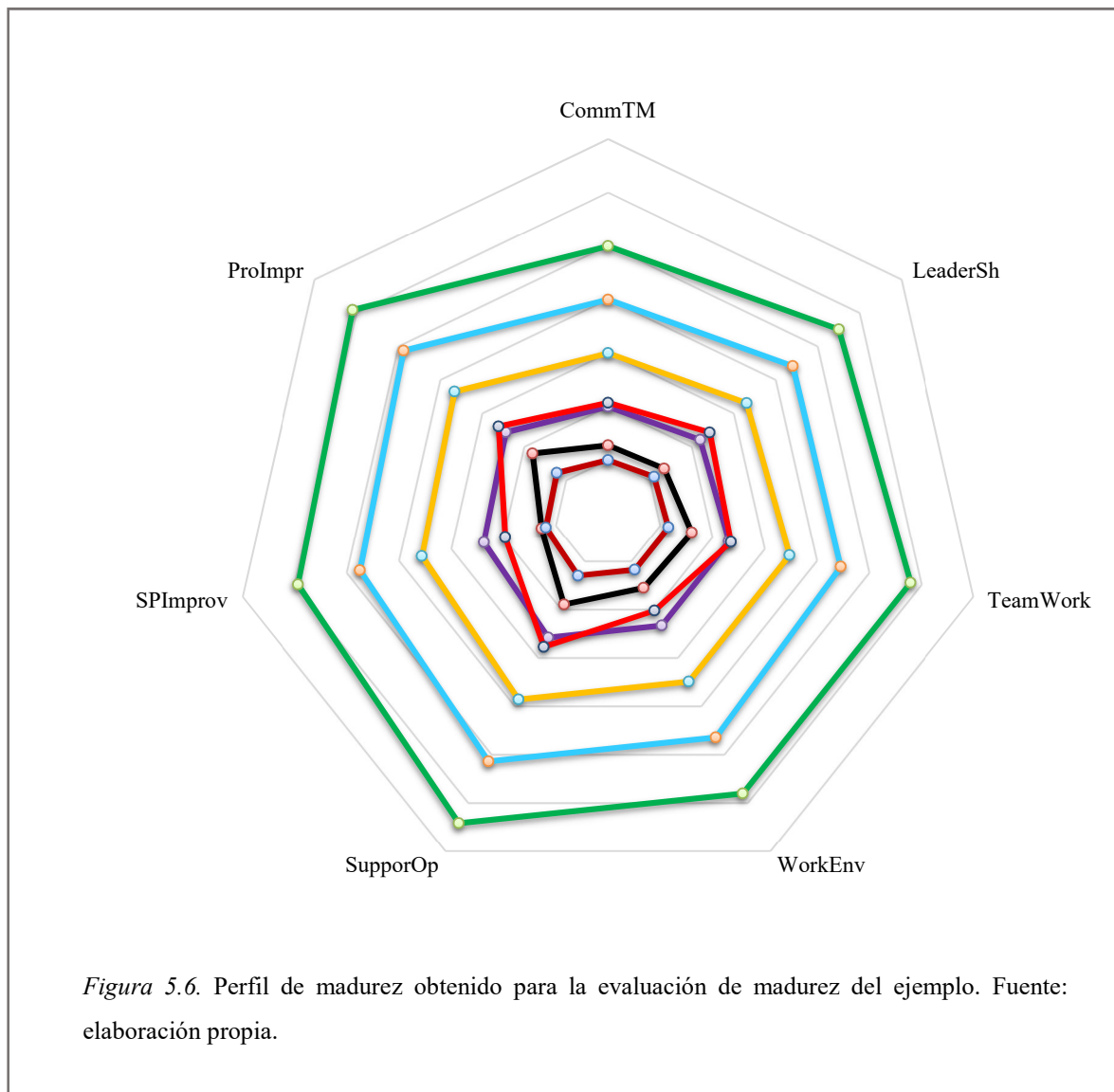
Fuente: elaboración propia.

Los IML se representan con diagramas de radar, donde los radios corresponden a cada uno de los atributos del respectivo FM. Estos FM están agrupados según las categorías de madurez a los que pertenecen (figuras 5.5 a, b y c). En las figuras se identifica con color negro el estado actual de madurez. El color rojo corresponde al nivel de madurez objetivo, que se explica en la sección 5.3.4.2.





Los ILM de esta evaluación de madurez, respecto de los perfiles de referencia, se presentan en la figura 5.6. Se identifica con color negro el perfil de la evaluación de madurez para el ejemplo, enmarcado en los perfiles de referencia de los niveles de madurez del modelo. El perfil identificado con el color rojo se refiere al nivel de madurez objetivo, el cual se obtiene en la sección 5.3.4.2.



A partir de los ILM se obtiene el IGM, el cual se presenta en la tabla 5.7. Se consigue primero un IGM₀ sin ajustar, pues obedece a la información recogida directamente del SLC-QT. Luego se realiza una transformación de escala en un rango entre 0 y 1, y más adelante se transforma a una escala entre 1 y 5; de esta manera se obtiene el IGM, el cual resume el nivel de madurez de LC en la GPC, esta es la calificación del estado actual del sistema. Para este ejemplo, el nivel de madurez global es 1,33.

Tabla 5.7. IGM de LC en la GPC. Resultado del ejemplo

ÍNDICE GLOBAL DE MADUREZ - IGM					
Factor de Madurez	Coficiente de Calificación para el IGM	ILMi	IGMo Sin ajustar	IGMo Cambio de escala a (0-1)	IGM Cambio de escala a (1-5)
CommTM	0,154	1,277	1,54	0,081804820	1,33
LeaderSh	0,134	1,348			
TeamWork	0,122	1,605			
WorkEnv	0,142	1,538			
SupporOp	0,151	1,884			
SPImprov	0,132	1,268			
ProImpr	0,165	1,803			

Fuente: elaboración propia.

5.2.7 Puntos clave de la sección

El Modelo de Madurez de LC en la GPC se compone de dos artefactos o herramientas: la Herramienta de Evaluación de los Atributos (SLC-MAET, Systemic Lean Construction Maturity Attributes Evaluation Tool), y la Herramienta de Calificación de Atributos (SLC-QT, Systemic Lean Construction Qualification Tool) que contiene las ecuaciones desarrolladas para calificar los ILM y el IGM.

Se obtienen las ecuaciones para la calificación de la madurez de los FM que se identifica por medio de ILM, y la fórmula para la calificación del IGM. Con estos datos se desarrolla la herramienta de calificación (SLC-QT) y se construyen los perfiles de referencia de la evaluación.

Con los ILM se construye el perfil madurez de la evaluación, el cual se compara con los perfiles de los niveles de referencia de madurez que servirá, junto con los ILM y el IGM, como elementos para establecer la estrategia de evolución.

5.3 Estrategia de Evolución de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción (SLC-ES)

Esta sección contiene el direccionamiento para el desarrollo de la Estrategia de Evolución de Madurez (SLC-ES), o Systemic Lean Construction Maturity Evolution Strategy. Esta estrategia se desarrolla a partir del análisis de la información obtenida con el Modelo de Madurez (SLC-MM), con la cual la Alta Dirección puede tomar decisiones precisas respecto de la evolución hacia niveles superiores de madurez. La Alta Dirección, con apoyo de los equipos involucrados en la evaluación de madurez en los diferentes niveles jerárquicos, direcciona la mejora continua de la producción del proyecto de construcción.

En la sección anterior se obtuvo el SLC-MM que consta de dos herramientas: SLC-MAET y SLC-QT. A partir de los indicadores de madurez se obtienen los ILM y el IGM, así como el perfil de madurez. Con esta información se desarrolla la estrategia de evolución, la cual requiere de varios equipos de trabajo. El SLC-EModel se concibe para apoyar un proceso de autoevaluación de la madurez y, con esta autoevaluación, se construye entre todas las personas de la organización, el plan de mejoramiento teniendo en cuenta la estrategia de evolución seleccionada.

5.3.1 Definición de los resultados esperados con la evolución de LC en la GPC y análisis de beneficios

La evaluación de la madurez se presenta como un proceso sistémico que propicia el entendimiento del estado del proceso de producción de proyectos de construcción para buscar un mejor desempeño, el cual se conduce con ayuda de una estrategia de evolución, cuyos resultados se materializan, entre otros, en el mejoramiento de la productividad y el crecimiento en los resultados del negocio. En este sentido, la evolución de la madurez debe ser un proceso que agregue valor a la organización, de tal manera que impulse la eficiencia de la producción y el aumento de la rentabilidad del negocio. De esta forma, antes de definir cualquier estrategia de evolución, la organización debe establecer claramente los resultados esperados de acuerdo con las metas y los objetivos empresariales.

Los procesos de cambio requieren de la motivación, el esfuerzo y la dedicación de cada una de las personas involucradas. La motivación es el elemento que propicia en las personas el impulso para participar, de este modo, si la organización obtiene beneficios de la evolución de su sistema de producción, las personas también deberían percibir esos beneficios de manera individual. De acuerdo con Chiavenato (2008), este es uno de los principales preceptos que deben ser cumplidos para desarrollar un proceso de evolución de la madurez y garantizar su sostenibilidad.

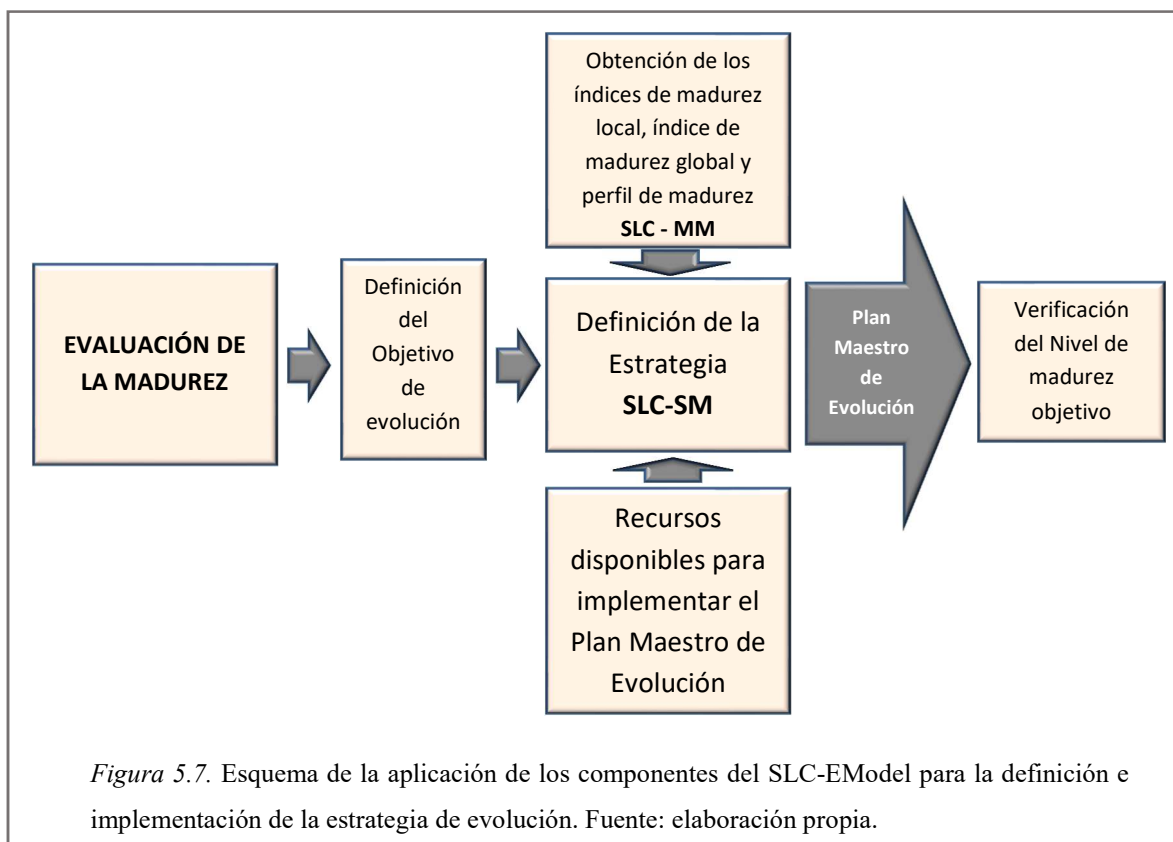
En la selección de incentivos, lo más importante es el hecho de que estos sean claros. Debe ser claro a quién premiar, de qué manera y por qué logros. Uno de los errores más frecuentes cuando se desarrolla un sistema de incentivos es basar el rendimiento en medidas absolutas, es decir, premiar solo a los que presentan un mejor resultado; sin embargo, estos resultados no se obtienen si no se cuenta con equipos confiables, es decir, los resultados se logran como equipo y no de manera individual (Fisher, 2005).

5.3.2 Estrategia de Evolución de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

El SLC-ES es un artefacto diseñado con una estructura similar a la del Modelo de Evaluación de Madurez. En la práctica hace uso de la misma estructura del SLC-MM. Este artefacto permite realizar un proceso de prospección usando el SLC-MM a la inversa de cómo se obtiene la evaluación de madurez LC de la GPC. El SLC-ES consulta las ecuaciones de madurez del SLC-QT con las cuales se calculan los ILM, de esta forma se identifican las exigencias de evolución de madurez para cada uno de los atributos del modelo para alcanzar el objetivo de evolución. En el modelo de evolución, es en el nivel jerárquico de los atributos donde se llevan a cabo las acciones de madurez, ya que su evolución influye en la obtención de más altos ILM que acerque la evolución al IGM objetivo.

La Estrategia de Evolución es un proceso que inicia con la definición del objetivo de evolución. Este objetivo implica diversas combinaciones de evolución de madurez al nivel de los atributos, con los cuales se obtienen ILM para cada una de las posibles combinaciones. Se buscan combinaciones de atributos cuyas acciones de evolución estén cercanas al estado de madurez actual, de esta manera se encuentra, entre las combinaciones, el camino más corto

y eficiente para llegar al objetivo de evolución propuesto. Esta selección de combinaciones se contrasta con la capacidad de la organización para llevar a cabo la implementación del Plan Maestro de Evolución, y se selecciona finalmente la configuración objetivo de evolución de atributos. En la figura 5.7 se esquematiza el uso del SLC-ES para definir el índice global de madurez objetivo (IGM_e) a partir de la intervención de los atributos.



En la figura 5.8, el SLC-ES requiere de tres entradas: (a) el SEM y los resultados de la evaluación de madurez, (b) la definición del objetivo de evolución, y (c) los recursos disponibles por la organización para el desarrollo del Plan Maestro de Evolución. El SLC-ES consulta las diferentes combinaciones de evolución de atributos para decidir cuál de ellas escoger de acuerdo con dos criterios:

1. La cercanía entre el estado actual de madurez y la madurez objetivo, considerando la importancia relativa del atributo en el FM y el efecto de los FM en el modelo.
2. La capacidad de la organización para atender las condiciones de evolución sugeridas por la configuración de niveles de madurez de atributos y FM, y así tomar decisiones respecto de la asignación de recursos a los atributos.

Para identificar el camino más corto y eficiente para alcanzar el objetivo de evolución propuesto, se requiere de la ayuda del Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM). Se debe recordar que con el SEM se conocen con precisión los valores de las contribuciones de los atributos en la explicación de cada FM que ellos componen. De igual manera, se conocen las interacciones de cada FM y, por supuesto, se calculan los valores de los ILM, con lo cual se configuran diversas rutas de efectos y una ruta crítica para la identificación del IGM₀.

De manera práctica, en un proceso de evaluación de madurez con el uso del SLC-MM, se identifica la madurez para cada atributo y se obtienen los ILM y el IGM de dicha evaluación. De igual forma, se determinan las rutas por las cuales se logra el IGM y se identifican los atributos y los FM más influyentes para la obtención de la madurez según la evaluación. Se comparan las rutas obtenidas en el desarrollo del SEM y se selecciona la ruta más cercana a la configuración definida en él. Como se explicó anteriormente, la selección de la ruta de evolución consulta la capacidad de la organización para asignar recursos, con los cuales se despliega la estrategia de evolución a partir de la mejor combinación de los niveles de madurez que deben alcanzar los atributos.

5.3.3 Equipos para el proceso de evolución de la madurez de LC en la GPC

La evaluación de madurez es un proceso sistémico en sí mismo, y todas las personas de la organización deben participar con el convencimiento de que se trata de una tarea que redunda en el mejoramiento global y trae beneficios a todos los actores en el proceso de producción de proyectos de construcción. El sistema de evaluación debe disponer de un equipo evaluador de los atributos, un equipo calificador de la madurez, un equipo evaluador del estado actual de la madurez, un equipo de estrategia y un equipo de decisión de la estrategia más apropiada para la evolución.

Los equipos están conformados por las personas de la organización. Estos equipos entienden el estado actual de madurez a través del SLC-MM y proponen las estrategias para que la Alta Dirección seleccione la que más convenga a sus intereses de acuerdo con el Plan Maestro de Evolución. Este plan se pone en práctica por medio del plan de acción. Los niveles jerárquicos de aplicación se establecen en tres categorías, sin embargo, los equipos del

proceso de evolución deben ser constituidos interdisciplinariamente con la participación de todas las categorías de manera sistémica, las cuales integran a las personas, así:

- **Alta Dirección:** Junta Directiva, gerentes, socios, clientes, asesores y otros de acuerdo con este nivel jerárquico y la configuración de la organización.
- **Dirección Operativa:** directores de áreas funcionales, personal de las áreas funcionales, proveedores y otros de acuerdo con este nivel jerárquico y la configuración de la organización.
- **Proyecto:** directores de proyectos, directores de fases, profesionales, tecnólogos, técnicos, obreros y otros de acuerdo con este nivel jerárquico y la configuración de la organización.

El equipo de evaluación es muy importante para el éxito de la identificación del estado actual y para desarrollar el Plan Maestro de Evolución. Como se ha explicado previamente, el espíritu de este modelo es que sea utilizado con fines de autoevaluación, en cada una de las fases de desarrollo del proyecto de construcción, por todas las personas involucradas en la GPC. En este sentido, el esquema presentado en la figura 5.8 muestra las relaciones entre los equipos que apoyan la aplicación del SLC-EModel, las personas que participan de la evaluación y la Alta Dirección que toma decisiones basadas en su interacción con los equipos. El SLC-MM es el centro de este proceso, pues a partir de la evaluación de madurez se toman las decisiones.

El proceso de autoevaluación debe ser una tarea constante y permanente, realizado a través de rutinas que se integren al quehacer diario. De esta manera, el SLC-EModel debe estar articulado con sistemas de información y sistemas de comunicación que hagan de la evaluación un proceso funcional y práctico. Se trata de un proceso de evaluación sistémico y participativo. En la figura 5.8 se aprecian los seis equipos que participan en la implementación del SLC-EModel, articulados sistémicamente.

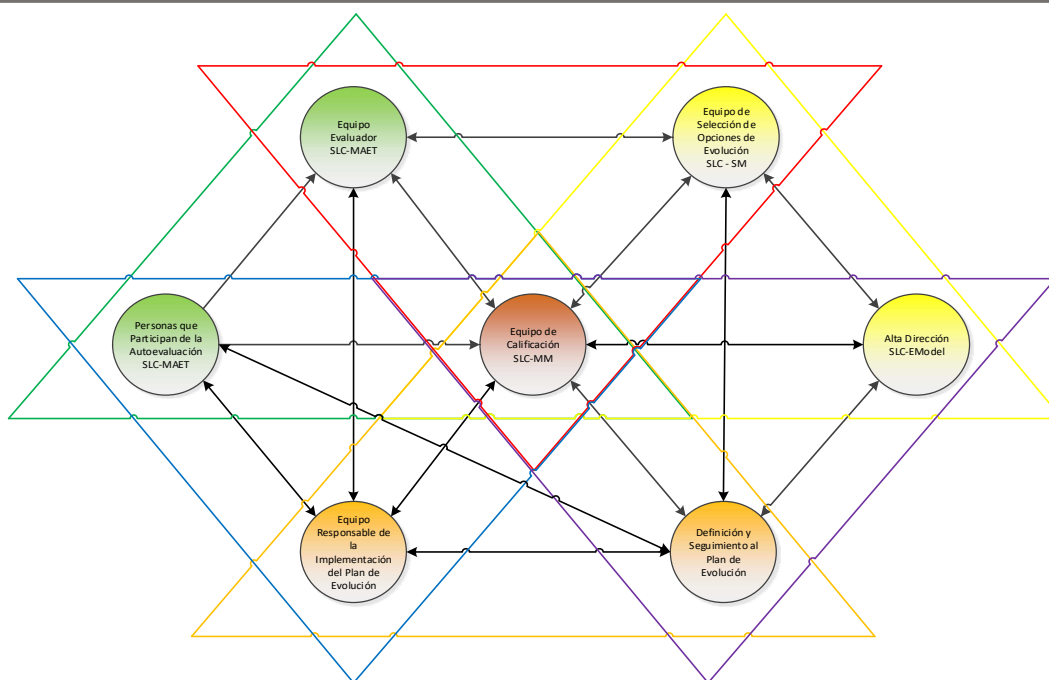


Figura 5.8. Relaciones entre los equipos y la Alta Dirección para la aplicación del SLC-EModel.

Fuente: elaboración propia.

El elemento articulador de la evolución es el claro entendimiento del estado actual de madurez, información a partir de la cual se toman decisiones y se propone la estrategia de avance al siguiente nivel. Los equipos se agrupan de acuerdo con el alcance de su intervención, según se muestra en la tabla 5.8.

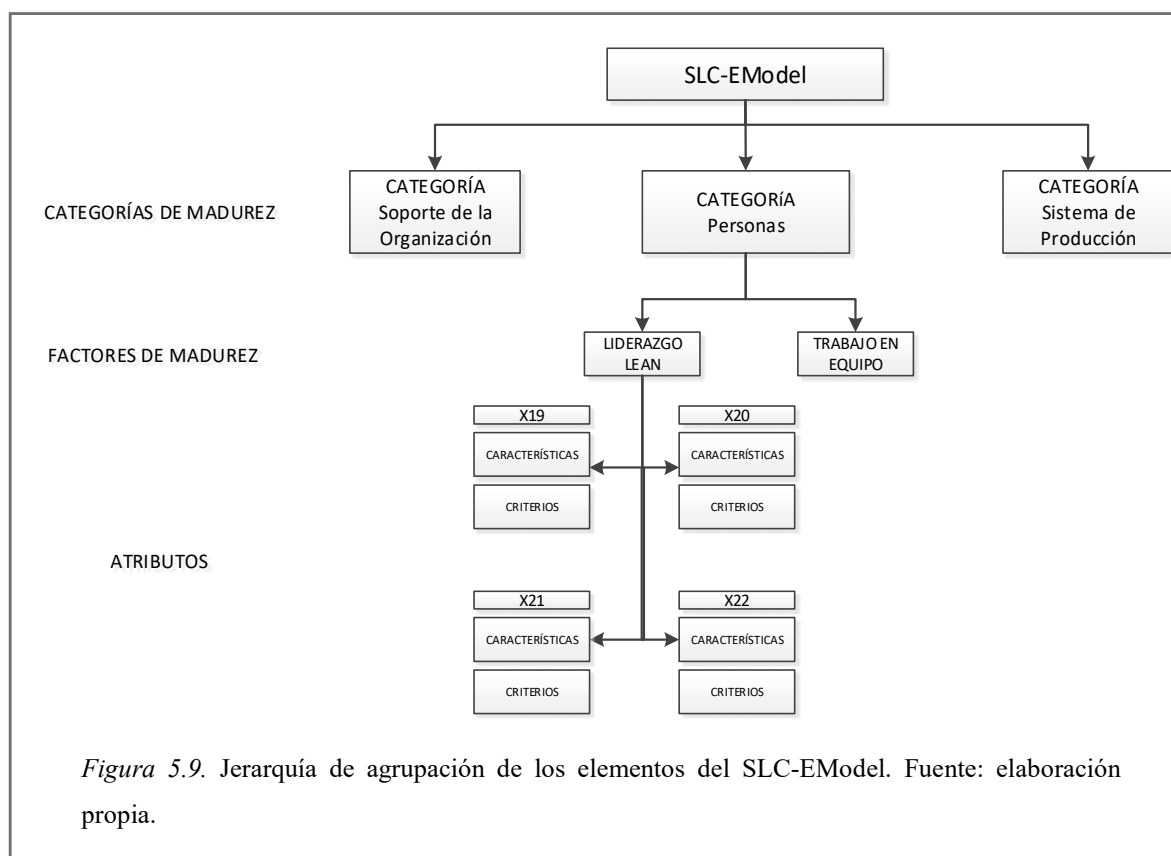
Tabla 5.8. Responsabilidades de los equipos del proceso de evolución de LC en la GPC

Equipos de trabajo	Responsabilidades
Verde	Evaluar la madurez de LC en la GPC.
Rojo	Seleccionar las combinaciones de atributos según el IGM _e objetivo.
Amarillo	Decidir sobre la configuración de evolución de atributos para desarrollar el Plan Maestro de Evolución.
Morado	Definir el Plan de Evolución.
Azul	Realizar la implementación del Plan de Evolución.
Naranja	Seguimiento a la implementación del Plan de Evolución.

Fuente: elaboración propia.

5.3.4 Aplicación del Modelo de Evolución de Lean Construction en la Gestión de producción de proyectos de construcción

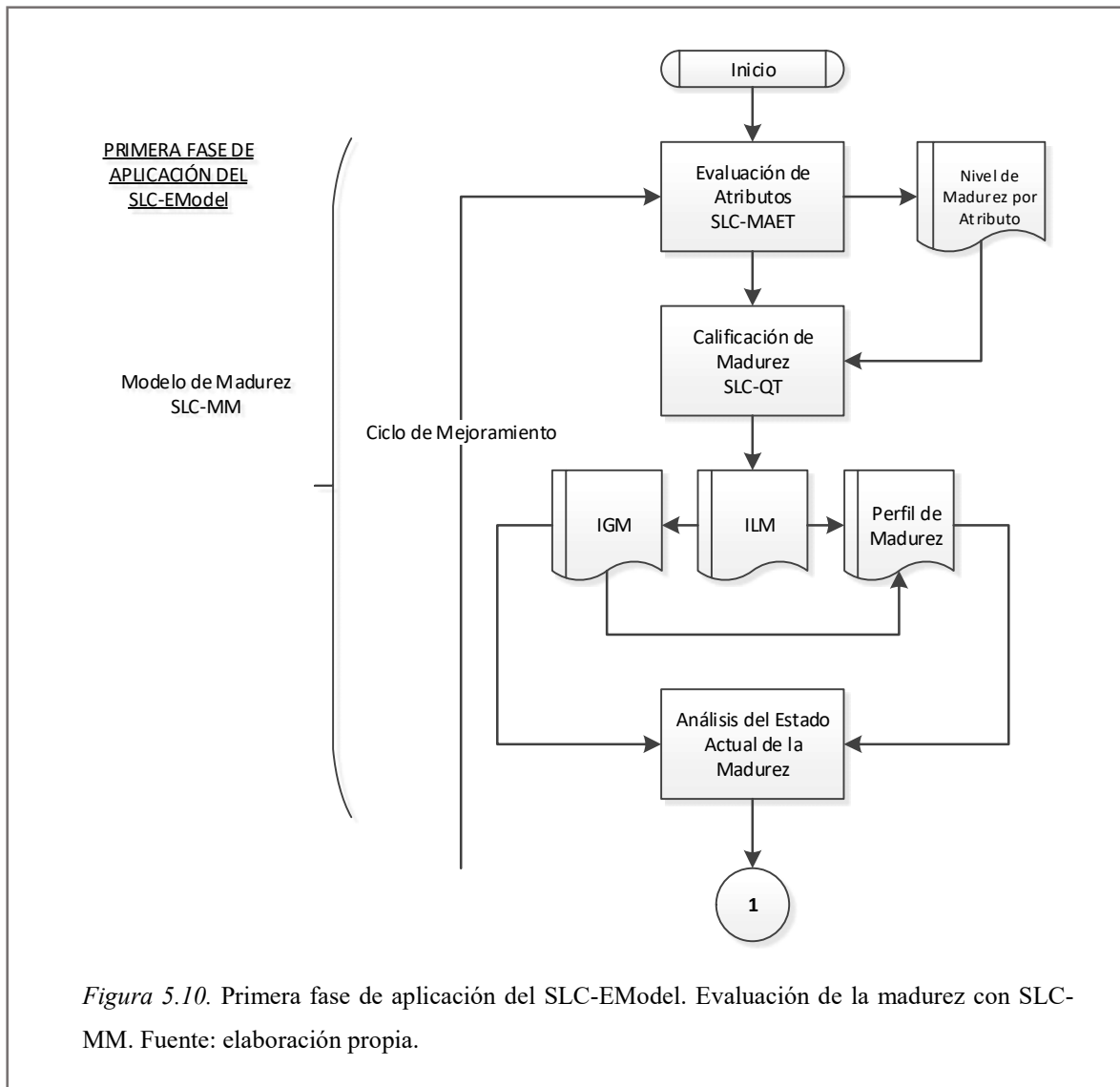
Al aplicar el SCL-EModel se recomienda hacerlo en tres fases de manera secuencial, siguiendo la jerarquía de los elementos del modelo. Su aplicación va desde el elemento más desagregado (atributos), pasando por los niveles de agregación de FM y categorías, hasta llegar al nivel principal que agrupa todos los elementos en el modelo. La jerarquía se presenta en el esquema de la figura 5.9, donde se detalla el FM Liderazgo Lean a manera de ejemplo.



5.3.4.1 Primera fase de aplicación del SLC-EModel

En esta fase se evalúa la madurez de los atributos, se califica la madurez de los FM y la madurez global, se identifican los perfiles de madurez y se realiza el análisis del estado de LC en la GPC. En esta fase intervienen las personas que participan de la evaluación de los atributos, el equipo evaluador que gestiona y coordina las acciones de evaluación con el SLC-MAET y el equipo de calificación de madurez con el SLC-QT. El producto de esta fase son

el IGM, los ILM y el perfil de madurez del proceso en evaluación. En la figura 5.10 se muestra el diagrama de flujo que sirve de guía para llevar a cabo la aplicación del SLC-EModel en el proceso de esta fase.



- **Evaluación de la madurez de los atributos**

Se evalúan los atributos de madurez según el alcance de sus características y criterios de valoración definidos en el SLC-MAET para cada una de las fases del proyecto de construcción. El nivel se considera alcanzado si se cumplen todas las características

especificadas para las fases del proyecto que sean definidas en ese mismo nivel. El resultado es la identificación del nivel de madurez alcanzado por atributo.

Es importante, para la construcción del Plan Maestro de Evolución, conocer detalles de la evaluación de aquellos atributos que no alcanzan un nivel de madurez específico. Esa transición entre un nivel de madurez a otro, en esta investigación se ha denominado Subnivel de Madurez de los Atributos. Este subnivel hace uso de la habilidad del evaluador para identificar el estado del alcance de la madurez del atributo cuando esta no se reporte completa. Esta es la progresión del alcance de madurez del atributo. Se podrá usar una evaluación de progresión de alcance del nivel para cada atributo en un intervalo que especifique un estado entre *inmaduro* y *casi maduro*.

- *Inmaduro* corresponde a un intervalo entre 0 y 0,5, donde no están incluidos ni el cero ni el 0,5. El cero no se incluye, pues solo se califica cero si se verifica la inexistencia del atributo.
- *Casi maduro* corresponde a un intervalo cerrado a la izquierda, donde está incluido el 0,5 pero no está incluido el 1 ($0,5 - 1$).

Se advierte que esta evaluación contiene un alto grado de subjetividad por parte del evaluador. Sin embargo, es un indicador de avance del proceso de madurez del atributo que sirve a la evaluación para identificar qué características le faltan al atributo para alcanzar el nivel de madurez más cercano.

- ***Calificación de la madurez***

Con la identificación de los niveles de madurez de cada atributo, se hace uso del SLC-QT para obtener los indicadores resultantes de esta calificación, los ILM y el IGM_o. Esta calificación puede ser obtenida mediante la aplicación desarrollada que se presenta en el Anexo 5.2. La calificación para el IGM_o que resulta de la combinación de los ILM se cambia a una escala entre 1 y 5, con la intención de que el tomador de decisiones tenga una apreciación del nivel de madurez global en términos más fáciles de entender, así se obtiene el IGM. En efecto, es más fácil de entender un nivel de madurez 1 en la escala transformada, que un nivel de madurez 1,16 en la escala original.

- ***Identificación del perfil de madurez***

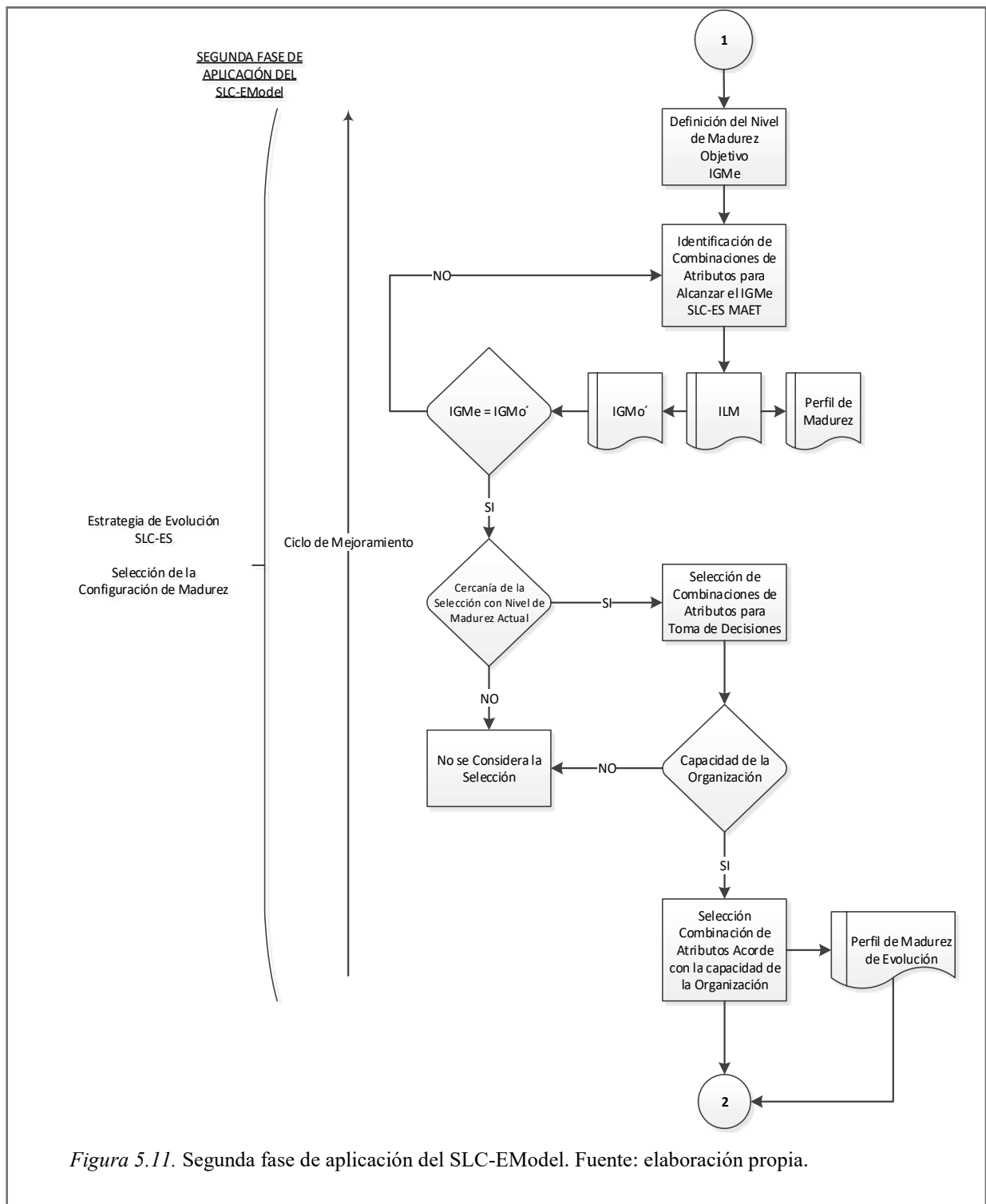
La agrupación de los ILM en un diagrama de radar permite identificar el perfil de madurez de la evaluación, con lo cual se compara con los perfiles de referencia y se establece la distancia de esta evaluación de madurez y el perfil de referencia más cercano.

- ***Análisis del estado actual de la Gestión de producción de proyectos de construcción***

El IGM es consecuencia de la evaluación individual de los atributos. Con la herramienta de calificación se identifica el estado actual de madurez y se precisa la influencia de cada atributo en el alcance de la madurez actual. Por lo tanto, a partir del conocimiento de las evaluaciones individuales y de cómo ellas impactan la calificación global, se obtiene la información para seguir a la segunda fase.

5.3.4.2 Segunda fase de aplicación del SLC-EModel

En esta fase se cuenta con la evaluación de madurez y se define el nivel de madurez objetivo por medio del IGM_e. Esta es la meta parcial a la que se desea llegar de camino a la madurez. En directa relación con el IGM_e se definen los beneficios que deben ser alcanzados. El planteamiento de beneficios esperados es un indicador para más adelante evaluar la efectividad del avance en el nivel. Este se refiere al beneficio parcial a alcanzar en el camino hacia el beneficio que ofrece un proceso maduro. En esta fase se definen dos tipos de indicadores: (a) nivel de madurez objetivo y (b) beneficios del cambio. Intervienen la Alta Dirección y los equipos de selección de Opciones de Evolución, Calificación y Evaluación. Su objetivo es preparar las opciones de avance de madurez para la toma de decisiones. En la figura 5.11 se muestra el diagrama de flujo del proceso de esta fase.



- **Definición del estado futuro de la Gestión de producción de proyectos de construcción**

Con el IGM_e se hace uso de la aplicación del SLC-ES para identificar el IGM_o' . Este es el índice global en la escala original para el IGM_e , el cual se obtiene mediante un cambio de escala en el sentido inverso que se utilizó para calcular el IGM. Este IGM_e debería ser el resultado de la calificación de los atributos a ser intervenidos para lograr el IGM_o' . La combinación de atributos a ser intervenidos obedece a diferentes combinaciones posibles con las que se logran diferentes IGM_o' . Sin embargo, todas las posibilidades no son viables, así que se debe efectuar una selección de aquellas combinaciones cuyos atributos guarden cercanía con la evaluación de madurez de los mismos. Esta cercanía permite un avance de evolución al siguiente nivel. De tal manera que con las combinaciones así seleccionadas se verifica la capacidad de la organización para intervenir los atributos y posteriormente elaborar el Plan Maestro de Evolución.

Siguiendo con el ejemplo del aparte 5.1.8, se explica el proceso referido a la segunda fase:

Para el ejemplo, la madurez objetivo es $IGM_e = 2,0$. En la tabla 5.9 se presenta el $IGM_e = 2,0$, el cual es definido por la organización luego de conocer el resultado de la evaluación de madurez. Para este caso, la evaluación de madurez obtuvo un $IGM = 1,33$, de esta manera, la organización decide dar un salto desde un nivel de madurez de 1,33 a un nivel de madurez de 2,00. Al realizar dos transformaciones de escala, primero de una escala entre 1 y 5 a una entre 0 y 1, se obtiene el índice objetivo $IGM_o' = 2,32$ en la escala del modelo.

Este $IGM_o' = 2,32$ se puede obtener con diversas combinaciones de madurez de los atributos. En cualquier caso, cada una de estas combinaciones calificadas con el SLC-QT hace uso del coeficiente de calificación de cada FM para obtener el IGM_o (segunda columna de la tabla 5.9), una vez se hayan calificado los FM. La tercera columna queda en blanco a la espera de las combinaciones de atributos que alcance el IGM_e .

La combinación de atributos se realiza con ayuda del SLC-MAET (que para esta fase se denomina SLC-ES MAET) para identificar las combinaciones para el IGM.

Tabla 5.9. Definición del índice global de madurez objetivo (IGMe)

ÍNDICE GLOBAL DE MADUREZ OBJETIVO - IGM _e					
Factor de Madurez	Coficiente de Calificación de FM	IML Mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la Ruta Crítica del SEM	IGMo [*] Objetivo de Evolución sin transformar	IGMe Cambio de escala a (0-1)	IGMe Objetivo de Evolución Cambio de escala a (1-5)
CommTM	0,154		2,32	0,250	2,00
LeaderSh	0,134				
TeamWork	0,122				
WorkEnv	0,142				
SupporOp	0,151				
SPImprov	0,132				
ProImpr	0,165				

- ***Selección de combinaciones de atributos para toma de decisiones***

Con las combinaciones identificadas en el paso anterior, se consulta la distancia de la madurez de cada uno de sus atributos con el nivel de madurez inmediato superior, y se seleccionan aquellos que tengan una diferencia de un nivel de madurez. De esta manera se eligen las combinaciones que serán objeto de revisión frente a la capacidad de la organización para atender la evolución hacia el siguiente nivel de madurez de cada uno de los atributos que contribuyan a alcanzar el IGM_e.

- ***Identificación del perfil de madurez de evolución que impulsa a la Gestión de producción de proyectos de construcción al siguiente nivel***

Con base en las combinaciones de atributos seleccionadas, se identifican sus perfiles, y estos son los que tienen más posibilidades de ser implementados. Los criterios para seleccionar los perfiles son los siguientes:

- Todos los atributos tienen la misma oportunidad de pasar al siguiente nivel de madurez.
- Un atributo, en condiciones normales, puede avanzar un nivel a la vez.
- Si se desea que un atributo avance más de un nivel de madurez, debe recibir recursos adicionales que lo hagan dar ese salto.
- Los atributos se pueden combinar en todas las posibilidades, de tal manera que la calificación del IGM obtenido sea igual o muy cercano al IGM_e.

- Una pista para identificar el mejor perfil a seleccionar en esta fase es hacer que los atributos avancen al siguiente nivel interviniendo la menor cantidad de atributos.

En el ejemplo que se viene desarrollando, en la tabla 5.5, en la columna denominada “Selección SLC-SM MAET” se propone una combinación de evolución de atributos con la cual se lleva el $IGM = 1,33$ a un $IGM = 2,00$.

- ***Comparación de las condiciones actuales y la capacidad de la organización para cumplir los requerimientos que exige el estado futuro***

En este punto se dispone de varias configuraciones de combinaciones de atributos viables para ser implementados, con los cuales se consultan la capacidad y los recursos de la organización para ser llevados a cabo y elaborar el Plan Maestro de Evolución. De esta manera se selecciona la combinación que, a juicio de la Alta Dirección, pueda ser implementada de acuerdo con la disponibilidad de recursos.

Para el ejemplo, con la combinación de atributos de la sexta columna de la tabla 5.5 se realiza el análisis a continuación.

Los perfiles de los atributos intervenidos se presentan en los diagramas de radar dibujados en color rojo, figuras 5.6 a, b y c, y el perfil resultado de los ILM para la evolución se dibuja en la figura 5.7 también en color rojo. De igual manera, el $IGM_e = 2,00$ equivalente al $IGM_o' = 2,33$ ligeramente superior al objetivo 2,32 en la escala sin transformar. En la tabla 5.9 se muestran los resultados de esta selección de combinación de atributos. Se puede observar la diferencia entre la columna “IML Mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la ruta crítica del SEM” de la tabla 5.10 y la columna del IML_i de la tabla 5.7. Estas columnas, para efectos de comparación, se presentan en la tabla 5.11, donde se muestran los resultados de madurez de los FM para la evaluación con $IGM = 1,33$ y la evolución con $IGM_e = 2,00$.

Tabla 5.10. Índice global de madurez objetivo (IGMe) obtenido de la selección con el SLC-SM MAET

ÍNDICE GLOBAL DE MADUREZ OBJETIVO - IGMe					
Factor de Madurez	Coefficiente de Calificación de FM	IML Mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la Ruta Crítica del SEM	IGMo' Objetivo de Evolución sin transformar	IGMe Cambio de escala a (0-1)	IGMe Objetivo de Evolución Cambio de escala a (1-5)
CommTM	0,154	2,072	2,33	0,251175687	2,00
LeaderSh	0,134	2,431			
TeamWork	0,122	2,355			
WorkEnv	0,142	2,011			
SupporOp	0,151	2,766			
SPImprov	0,132	1,970			
ProImpr	0,165	2,616			

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5.11. Comparación entre el IGM de la evaluación 1,33 y el IGMe para la evolución al nivel 2,00

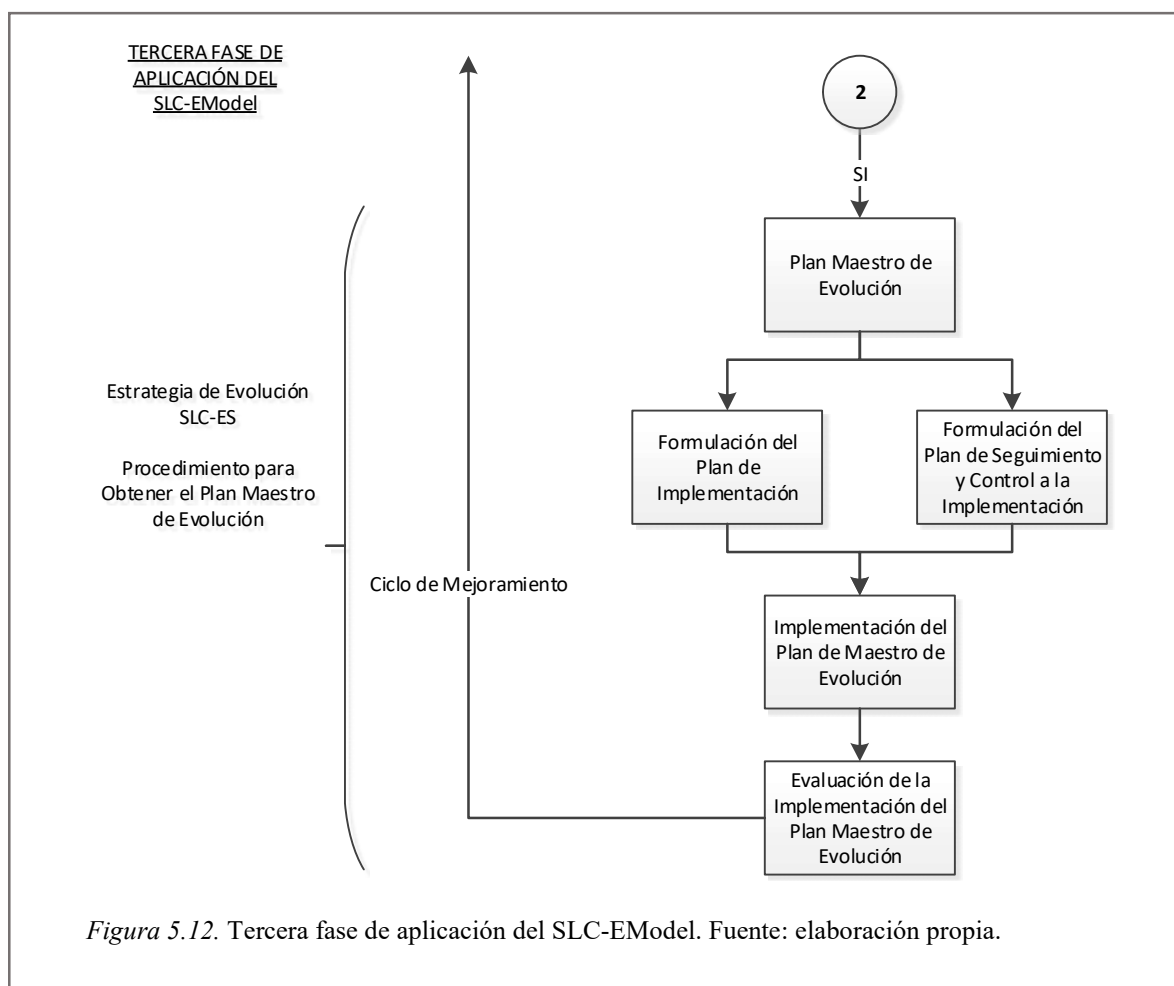
ILMi	IML Mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la Ruta Crítica del SEM
IGM = 1.33	IGM = 2.00
1,277	2,072
1,348	2,431
1,605	2,355
1,538	2,011
1,884	2,766
1,268	1,970
1,803	2,616

Fuente: elaboración propia.

Con la columna “IML Mejor escenario para alcanzar el objetivo de evolución según la ruta crítica del SEM” se confirma que se puede alcanzar el IGMe = 2,00. Adicionalmente, se verifica que el modelo de calificación es consistente y estable para realizar el proceso de calificación como apoyo a la estrategia de evolución. A partir de este punto, se toman decisiones en el máximo nivel jerárquico, la Alta Dirección, con el apoyo del Equipo de Selección de Alternativas.

5.3.4.3 Tercera fase de aplicación del SLC-EModel

La Alta Dirección es la instancia que establece el direccionamiento estratégico de la organización para el cumplimiento de las metas empresariales. Sin embargo, este direccionamiento no es posible si no hay una clara colaboración entre todas las partes del sistema. Las actividades de la tercera fase están a cargo de la Alta Dirección con apoyo del Equipo de Selección de Opciones de Evolución. Se dispone de la combinación de atributos seleccionada que se ajusta a las expectativas y capacidades de la organización. En la figura 5.12 se muestra el diagrama de flujo del proceso de esta fase.



La evaluación es una actividad que agrega valor a la organización, con ella se evidencian las situaciones que se oponen a la evolución, se abordan y se superan. En la figura 5.13 se presenta una versión preliminar de la Cadena de Valor de la Evaluación de Madurez con el

SLC-EModel que puede ser tomada por las organizaciones para construir su propia cadena de valor. En la figura 5.14 se representan las comunicaciones entre los procesos de gestión y los procesos de ejecución con flechas en dos vías que indican que la comunicación se establece en un canal de dos vías propiciando interacción entre los participantes. La organización es el cliente del proceso de evolución, y las personas y los procesos del proyecto de construcción son los proveedores de información para la evaluación.

Este es un sistema *pull*, en el que la necesidad de mejoramiento requiere del proceso de evolución. El cliente espera el salto a un nivel de madurez superior y la entrega de un plan de mejoramiento implementado y evaluado para verificar su alcance al siguiente nivel. Para esto se necesita la implementación y verificación de la efectividad de la implementación. Previo a esto, se debe definir el plan de acción, el plan de mejoramiento y su plan de seguimiento. La selección de la alternativa de evolución entre las opciones identificadas a partir de la calificación de la madurez se realiza con la evaluación de la madurez de los atributos de manera individual por las personas, quienes conforman equipos de trabajo alrededor de sus procesos.

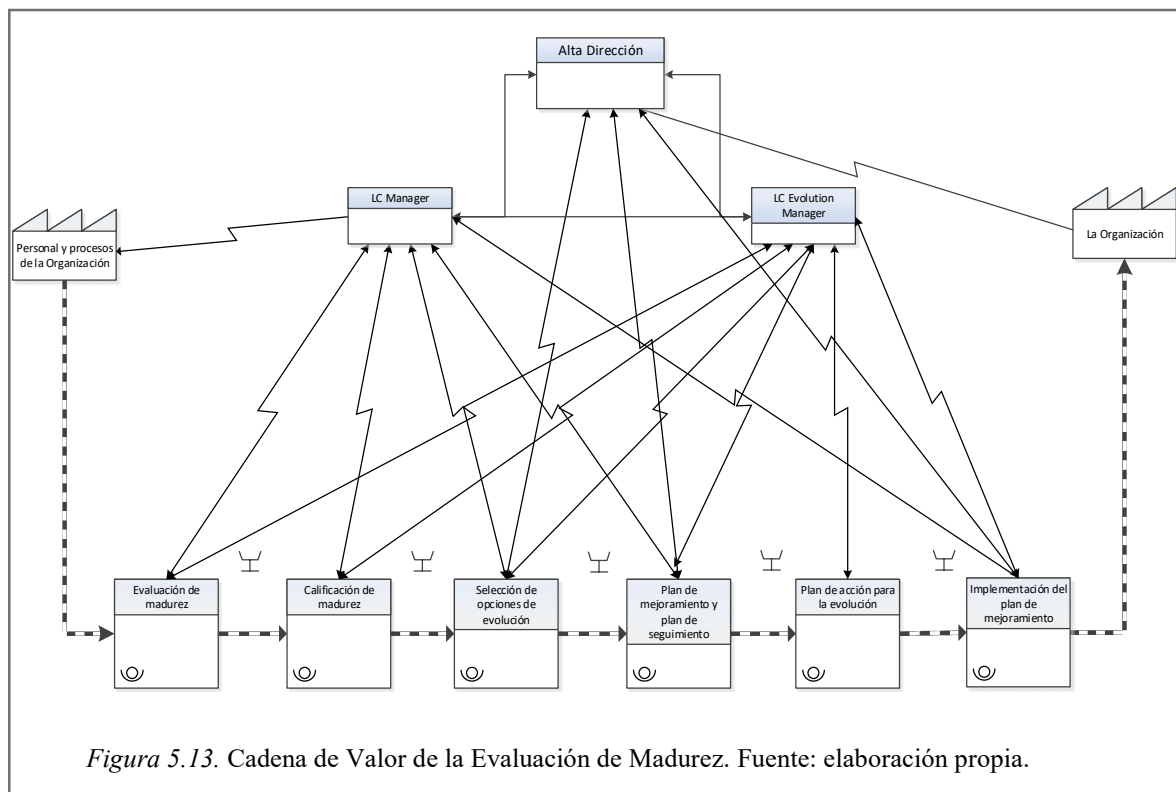


Figura 5.13. Cadena de Valor de la Evaluación de Madurez. Fuente: elaboración propia.

- ***Formulación del Plan Maestro de Evolución para alcanzar el estado futuro***

La ejecución de este plan lleva la GPC al siguiente nivel. Este plan está compuesto por un plan de implementación y un plan de acción. Se diseña a partir de la definición de las metas de evolución y la expectativa de resultados reales que se pretenden alcanzar con el avance al siguiente nivel. Es por eso que se trata de un trabajo con un alto nivel de conocimiento del impacto que produce un salto en evolución por parte de la Alta Dirección.

En el plan de mejoramiento se establecen todos los requerimientos para intervenir los atributos y avanzar al siguiente nivel de madurez, con la definición de indicadores que demuestren el alcance del mejoramiento, la intención y la meta. El plan de acción, por su parte, establece responsables, define programas de trabajo, asigna recursos, indica mecanismos de seguimiento y ajuste al plan y propone incentivos para todos los participantes.

- ***Seguimiento y control a la ejecución del plan***

Cada tarea prevista en el plan de implementación es objeto de seguimiento y control del avance de su ejecución. Se establecen indicadores de avance y se prevé la forma de corregir las desviaciones del plan. Para esta actividad, la herramienta más apropiada es el Sistema del Último Planificador (Last Planner System, LPS, por sus siglas en inglés). El LPS no es una herramienta solo para la fase de construcción, también puede ser usada en todo tipo de proyectos y en cualquier fase del desarrollo del proyecto de construcción. La ejecución del Plan Maestro de Evolución es un proyecto de gran envergadura para la organización. La aplicación del LPS para la planificación y control de la ejecución de este plan será objeto de una investigación futura.

- ***Autoevaluación permanente***

El SLC-EModel promueve la autoevaluación como parte del crecimiento cultural de la organización, y como producto de esta investigación, se fortalece la definición de Lean Construction. LC promueve el desarrollo de una cultura con enfoque en el cliente, que persigue permanentemente el desperdicio, y de mejora continua apoyada en la autoevaluación permanente. Un proceso de evolución de la madurez fundamentado en el SLC-EModel, requiere del desarrollo de un sistema de información y de comunicación que permita la gestión del flujo de información. El proceso de evolución de la madurez es un

proceso de producción en sí mismo, es un proceso de producción de información con un fin preciso, la evolución.

5.3.5 Puntos clave de la sección

Disponer de una estrategia que conduce las acciones de madurez adquiere valor en la medida en que se entiende la manera de desarrollarla y desplegarla. El SLC-EModel cuenta con un modelo de evaluación y una estrategia de evolución con los cuales se desarrolla el plan de intervención con el cual avanzar al siguiente nivel de madurez.

CONCLUSIONES

- **Conclusiones generales**

En esta tesis se diseñó un Modelo de Evolución de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de Proyectos de Construcción (SLC-EModel). Este modelo es una herramienta, o artefacto, como lo denomina el Design Science Research (DSR), para ayudar a orientar las acciones de mejoramiento de la Gestión de producción de proyectos de construcción (GPC) al integrar a Lean Construction (LC) como su sistema de producción.

Se desarrolló de un Modelo de Madurez con el cual se logra mediar el nivel de madurez de LC en la GPC y se estudian e identifican las relaciones entre los diferentes elementos de la madurez.

El SLC-EModel es una herramienta que apoya la definición de estrategias de mejoramiento de la producción de proyectos de construcción con la integración de LC como su sistema de gestión cuya validez se verifica en cuatro instancias del desarrollo del modelo.

Se trata de una herramienta que se prevé puede contribuir a mejorar continuamente la eficiencia de la producción de construcción. Una mejora de eficiencia trae como consecuencia la mejora de la productividad que beneficia a la organización y al sector.

El SLC-EModel se propone como una herramienta útil para contribuir con el desarrollo del sector de la construcción y podría ser fácilmente adaptado en otros sectores de producción de bienes o servicios. Su creación fue prevista con enfoque en LC, sin embargo, su desarrollo permitió la obtención de un modelo de características genéricas. A su vez, los elementos asociados a estas categorías, a pesar de ser utilizados en la implementación y desarrollo de LC, son comunes a otros procesos de producción.

El SLC-EModel se compone de 3 categorías, 7 factores de madurez y 35 atributos de madurez. Las *categorías* son los constructos de mayor nivel del modelo y se componen de *factores de madurez* (FM); los FM agrupan los *atributos de madurez* que los explican, son los constructos de nivel intermedio del modelo y, los atributos se hallan en el nivel básico del modelo. Las tres categorías de madurez del modelo son:

- Personas
- Sistema de Producción
- Soporte de la Organización a la Producción

En el diseño del SLC-EModel se identificaron elementos relevantes directamente relacionados con la madurez de LC en la GPC. Estos elementos fueron clasificados en las tres categorías de madurez mencionadas subordinadas a los FM.

Para el Sistema de Producción de Proyectos de Construcción, las personas son muy importantes. La producción se lleva a cabo con personas y las implicaciones que directamente tienen que ver con personas se encadenan para aportar en la mejora del flujo de producción. En el proyecto de construcción, todos los procesos se realizan con personas; las personas conforman equipos, y los equipos se desenvuelven en los ambientes de trabajo. De esta manera, las empresas no deben dejar de concentrar sus esfuerzos en la formación de su capital humano; este es un concepto que refuerza la concepción del modelo. El desempeño de LC se basa en la gente, así que se debe fortalecer el capital humano y construir una cultura LC.

Para lograr la adopción y la aplicación de tecnologías de proceso en la industria de la construcción, se requiere de una mejor comprensión de las prácticas de gestión de la innovación. Un modelo de evolución debe ser una herramienta sencilla de aplicar, que incluya las personas en los diferentes niveles de la organización de manera sistémica. Un modelo de este tipo se aplica a toda la GPC y debe reflejar lo que sucede en cada fase del proyecto.

El modelo debe ser entendido y aplicado como un proceso de autoevaluación, en el que se califica el nivel de implementación de las prácticas y la integración de procesos con el uso de indicadores mediante el establecimiento de condición de mínimas prácticas. Alcanzar un primer nivel de madurez es el reconocimiento del proceso de implementación de LC con el cual se da inicio al desarrollo de un proceso progresivo de madurez.

Definiciones propuestas en el desarrollo de la investigación

En el desarrollo de la investigación se presenta la necesidad de contar con una serie de definiciones, las cuales son importantes para el avance del trabajo, así que, en ausencia de

algunas de ellas, o porque aún no se cuenta con definiciones precisas, en esta investigación se proponen las siguientes:

Cumplimiento de la oferta de valor

“Es la materialización de los atributos integrados a un producto o servicio, en su fabricación o desarrollo, luego de ajustar el sistema de producción a una adecuada interpretación de las expectativas del cliente”.

Lean Construction

“Lean Construction es un Sistema de Producción de Proyectos de Construcción, cuyo objetivo es garantizar el cumplimiento de la oferta de valor por medio de (a) la aplicación de los principios de la producción Lean en la industria de la construcción, (b) el desarrollo de una cultura de producción sin pérdidas, con enfoque en el cliente y de autoevaluación permanente, y (c) la utilización e innovación de la tecnología para la gestión y mejoramiento continuo de la producción”.

Madurez

“La madurez es el estado de máximo desarrollo, o estado de excelencia, que ofrece la capacidad de volver realidad el objetivo proyectado con el más eficiente uso de los recursos disponibles. Es un estado que se va alcanzando paulatinamente al transitar por diferentes estados de inmadurez, o niveles de madurez, que permiten escalar hacia un estándar máximo, un nivel de excelencia de referencia para el contexto, un “Gold Estándar” (Definición basada en Cano y Rivera, 2015).

Modelo de Excelencia en Lean Construction

“Un modelo de excelencia en LC es un marco sistémico de aplicación de principios que la organización adopta como guía. Orienta la generación de estructuras organizacionales que conducen comportamientos sistémicos para la búsqueda constante de altos rendimientos y rápido acercamiento a sus metas. Los altos niveles de madurez son coherentes con la estrategia organizativa, lo que propicia altos estándares de aplicación de los principios de manera sostenida. El impulsor es la construcción de valor para el beneficio de los clientes, de los accionistas y de la sociedad”.

Modelo de Madurez de LC en la GPC

“El Modelo de Madurez es el estándar de madurez completa del ciclo de la Gestión del Sistema de Producción de Proyectos de Construcción con el uso de Lean Construction. Este estándar permite identificar alcance progresivo de la madurez hacia la excelencia, por medio de la calificación del estado de madurez de cada uno de los elementos que lo componen”.

- **Conclusiones sobre los aspectos relacionados con la producción Lean de proyectos de construcción**

El cumplimiento de la oferta de valor

La gestión Lean del proyecto debe sincronizar todos los elementos que participan del proceso de producción de proyectos de construcción hacia la meta global, la mejora de la eficiencia para responder mejor al cumplimiento de la oferta de valor. El articulador de la producción es el valor, especificado a partir de los requisitos e intereses del cliente. Con la identificación del valor desde el punto de vista del cliente, se configura la oferta de valor. A partir de la oferta, el sistema de producción se ajusta a las condiciones que permitan crear y entregar el valor ofrecido. El sistema de producción debe ser ajustado para cumplir estrictamente con la oferta de valor, ni más ni menos.

La producción en construcción

La producción de proyectos de construcción es un tipo de sistema de producción por proyectos, sin embargo, el proyecto de construcción es diferente a cualquier otro tipo de proyecto y sus productos poseen características que los hacen únicos. En esta investigación se propone ampliar la clasificación de Miltenburg (1995) para incluir los proyectos de construcción con la característica de flujo como “Flujo Acompasado por la Unidad de Producción”, que para el caso de la industria de la construcción, y con mayor énfasis en la construcción de edificaciones, la unidad de producción es la cuadrilla de trabajo.

El desempeño de Lean Construction

Se identifica en la comunidad académica un creciente interés en evaluar el desempeño de LC para entender si el esfuerzo está produciendo resultados que beneficien a la organización. El SLC-EModel es un primer Modelo de Evolución de LC que se propone a la comunidad académica y profesional LC para la GPC, con el fin de acortar la brecha de la disponibilidad de herramientas de evaluación del desempeño de LC, toda vez que la literatura evidencia que se dispone de un limitado grupo de iniciativas de evaluación de LC. Dichas iniciativas se enfocan principalmente en la fase de construcción y solo un modelo a evaluar la capacidad de la organización a partir de la implementación de LC.

Se identificaron cuatro iniciativas de evaluación de LC, de las cuales tres se concentran en la fase de construcción y una de ellas en la madurez de LC en la organización de construcción, donde el proyecto de construcción es un factor de evaluación. En otros entornos se identificaron diversas metodologías para evaluar la madurez Lean, sin embargo, de estas iniciativas se extrajeron conceptos para apoyar la identificación del elemento de madurez. Entre estas consideraciones, se identifican coincidencias en temáticas como la implementación de LC, los principios LC, las herramientas utilizadas en LC y la manera como las personas se relacionan con LC, principalmente.

Se evidencia una alta concentración de MM con enfoque en el Capability Maturity Model Integration (CMMI.) Hay una alta incidencia de evaluaciones relacionadas con el desempeño de las herramientas LC en obra, sin embargo, las otras fases del proyecto están desatendidas pese a que se critica el hecho de que las fases de planeación y contratación son muy importantes para el buen desempeño de la fase de ejecución de la obra.

El desarrollo de las herramientas identificadas para evaluación de LC hace uso de métodos de investigación cualitativos, como entrevistas, encuestas, consultas a grupos focales, observación y recolección de información en sitio. En la mayoría de los casos, solo se utiliza la entrevista. También se utiliza una combinación de herramientas en el marco del desarrollo de métodos mixtos de investigación (métodos cualitativos y cuantitativos).

Los procesos de validación de las herramientas son escasos, lo que indica la existencia de una brecha entre el desarrollo de modelos de evaluación de madurez y su validación. No

se identificó, en el desarrollo de este estudio, ninguna iniciativa que apoye la evolución de madurez de la aplicación de LC.

Barreras y factores críticos de éxito (FCE)

La implementación de LC se enfrenta a situaciones que se oponen a su avance, así como también se apoya en acciones que las favorecen. Se propone enfrentar los FCE a las barreras para mitigarlas y eliminarlas, ya sea previo al inicio de la implementación o durante el proceso, a fin de evitar o reducir el impacto en el éxito de la implementación.

La implementación de Lean Construction

La claridad en los beneficios que la organización espera de LC es la principal condición para iniciar un proceso de implementación. En cierto modo, esta claridad es la condición con la cual se planifican las actividades y tareas relacionadas con la implementación. Por lo general, el beneficio de la implementación se experimenta en la mejora de la rentabilidad del negocio, al ser cada vez más eficiente para incrementar la productividad.

Hay diferencia entre implementar LC en la organización y en el proyecto. En la organización de construcción se conduce una implementación en términos de pensamiento Lean, y en el proyecto la implementación se basa en el cumplimiento de los principios LC y en la evolución de los atributos que contribuyen a alcanzar esta madurez.

La implementación puede iniciar por el diseño, por la producción, por el cliente o por los proveedores, esto depende de identificar aquella parte del proceso de producción que sea más influyente para otros procesos. Esto conduce la decisión de empezar a intervenir procesos internos o procesos externos, algunos con más énfasis en la relación con el cliente: los proveedores. En la actualidad no hay una orientación para realizar una implementación precisa y efectiva de LC que obedezca a entender la importancia de los elementos de madurez que impactan en el mejoramiento del sistema de producción y de la producción misma.

El consenso entre expertos sobre los beneficios de la implementación en el corto plazo establece que estos corresponden a la reducción de desperdicios, el incremento de la productividad, el aumento de la rentabilidad, el mejoramiento del flujo de trabajo y el aumento del valor. En el largo plazo, propician mayor retención de personal para el

proyecto y el ciclo de la GPC, mejora del ambiente de trabajo, incremento en la seguridad para las personas, más control del proyecto, mayor flexibilidad, desarrollo de una cultura en torno al mejoramiento continuo y eliminación constante del desperdicio, una cultura que habla el mismo idioma.

Principios Lean Construction

En esta investigación, los principios LC se agruparon en dos grupos: el Mejoramiento del Sistema de Producción y el Mejoramiento de la Producción. Esta agrupación se sugiere a partir de la correlación de los atributos de madurez identificada en la construcción del SEM (los once principios LC están incluidos en la categoría Proceso de producción como atributos de madurez).

Se identificaron cuatro principios adicionales que se integran al grupo de Mejoramiento del Sistema de Producción. Se sugiere integrar cuatro principios a los once propuestos por Koskela (1992):

- Desarrollo, uso y mantenimiento de estándares.
- Conocimiento, selección y uso apropiado de herramientas LC.
- Desarrollo de un sistema *pull*.
- Cumplimiento de la oferta de valor.

Sostenibilidad de LC

Con la utilización de LC, como un sistema de gestión de proyectos de construcción, se identifican con más precisión los objetivos involucrados en el desarrollo de la producción y entrega del producto, con base en el entendimiento del valor desde el punto de vista del cliente. Sin embargo, es importante buscar la sostenibilidad de la aplicación de LC, de lo contrario, se corre el riesgo de volver a los esquemas tradicionales. La base del éxito en la sostenibilidad de LC en la GPC es el entendimiento de sus principios y la manera como estos se despliegan en el proyecto y en la organización a través del fortalecimiento de una cultura dispuesta al cambio y al alcance progresivo de la madurez con el uso de LC.

- **Conclusiones sobre las preguntas de investigación**

Se identificó a partir de la consulta a 69 expertos un amplio grupo de características que muestran la manera en que LC madura en su relación con la GPC. A partir de esta investigación se puede investigar con más profundidad estas y otras características con base en las relaciones obtenidas con el SEM.

Se seleccionaron 425 elementos relacionados con la madurez de LC a partir de la revisión bibliográfica y la consulta a expertos que fueron agrupados en tres categorías, siete factores y 35 atributos de madurez.

La herramienta para realizar la evaluación de madurez de LC en la GPC resulta de un desarrollo propio, novedoso y se configura como un importante aporte para la industria de la construcción.

Se desarrollan gráficamente dos tipos de perfiles definidos en el SLC-EModel. Perfiles para los factores de madurez, los cuales muestran gráficamente el alcance de la madurez de cada factor con sus atributos relacionados que y el perfil para la madurez del sistema, el cual se construye a partir de los factores de madurez.

Las acciones para avanzar hacia niveles superiores de madurez son conducidas por la estrategia de evolución, la cual requiere de la evaluación de la madurez y con ayuda de las relaciones identificadas con el SEM, se establecen las rutas de evolución de acuerdo con la evaluación de madurez obtenida.

- **Conclusiones sobre el logro de los objetivos**

El objetivo general se alcanza con el diseño del modelo, sin embargo, este no se puede llevar a cabo sin el cumplimiento de los objetivos específicos. Cada uno de estos objetivos se logra con ayuda de métodos y herramientas asociados con la metodología propuesta.

Resumen sobre el logro de los objetivos específicos

Objetivos específicos	Cómo se logra el objetivo	Evidencia del logro
Precisar las características de la madurez de LC en la GPC de acuerdo con el enfoque de producción Lean.	Revisión de referencias bibliográficas y resultados obtenidos en las entrevistas a expertos.	Capítulo 2 y Capítulo 3, secciones 3.1, 3.3, 3.4 y 3.5.
Escoger los elementos involucrados en la madurez e identificar las relaciones entre ellos, que conduzcan a estructurar el modelo de evolución de LC en la GPC.	Revisión de referencias bibliográficas y resultados obtenidos en las entrevistas a expertos.	Capítulo 3, sección 3.2 y Capítulo 4, secciones 4.1, 4.2 y 4.3.
Adaptar y/o desarrollar una Herramienta de Evaluación de Madurez de LC en la GPC, que permita conocer el nivel actual para orientar su evolución hacia niveles superiores de madurez.	Desarrollo de un Modelo de Evolución de LC en la GPC con base en la información obtenida de la consulta a expertos por medio de la encuesta.	Capítulo 5, secciones 5.1 y 5.2.

• Conclusiones sobre la Estrategia de Evolución

Una evaluación de la madurez no debe ser vista como una auditoría, si esta fuera la visión, perdería relevancia el modelo para conducir un avance hacia niveles superiores de madurez. El proceso de evolución se conduce con apoyo del SLC-EModel, como un ejercicio de autoevaluación con el convencimiento de que cada persona en el sistema tiene el potencial de aportar a la construcción de la madurez de la GPC y de la organización.

Este modelo se concibe como una herramienta para la autoevaluación, por medio de la cual se identifica el estado de madurez de LC en la GPC; asimismo, se define una estrategia de evolución con el propósito de construir el plan de mejoramiento, también con la participación de las personas y los equipos de la evaluación.

El proceso de evolución de la madurez se concibe como un proceso sistémico con el cual se persigue un objetivo común: mejorar la eficiencia del Sistema de Producción de Proyectos de Construcción para incrementar la productividad de la organización. De esta manera, considerando el enfoque Lean, que es participativo y colaborativo, se fundamenta la importancia de definir el plan de evolución de manera participativa y colaborativa.

- **Conclusiones metodológicas**

La Investigación en Ciencia del Diseño (DSR, por sus siglas en inglés) fue la metodología de investigación seleccionada para el desarrollo de esta investigación. Esta forma de investigación es aceptada ampliamente por la comunidad académica e investigadora en temas de gestión de la construcción y especialmente por la comunidad que investiga específicamente en LC.

Con el uso de la metodología DSR se estudia el fenómeno de madurez y se desarrolla una solución a un problema real como es la necesidad de identificar la madurez de LC en la GPC y establecer la manera de evolucionar hacia un nivel superior de madurez.

Esta investigación consideró la realidad del fenómeno de la madurez y realizó una aproximación a su complejidad como una manera de entenderlo. Se verificaron los criterios de calidad para considerar el rigor de esta investigación en su ámbito cualitativo, así:

- El estudio cuenta con la **fiabilidad** o **consistencia** para que pueda ser replicado por otros investigadores para obtener resultados similares.
- La **validez** de los resultados fue probada a lo largo de las etapas de obtención de la información y construcción del SEM.
- Se puede asegurar la **autenticidad** de la investigación, ya que sus resultados representan ampliamente el fenómeno de madurez observado sin dejar espacio a interpretaciones *a priori* de la investigadora. Los resultados del SEM representan clara y ampliamente los constructos a los que hace referencia.
- Los resultados de esta investigación se pueden **transferir** a otros sectores, dado que con la intención de obtener un modelo para LC en la GPC, se dispone de un modelo genérico que puede ser usado al ser adaptado en procesos de madurez de producción de bienes o servicios.
- Los datos para el estudio corresponden a la opinión de los expertos en LC, cuya calidad de la selección de ellos fue confirmada con el alfa de Cronbach, por lo que se cumple con el criterio de **dependencia**, ya que, para una réplica del estudio, se pueden obtener resultados equivalentes.

- La **neutralidad** del estudio está garantizada por el tratamiento de la información obtenida de los expertos por medio de las entrevistas y encuestas, a esta información se le dio el tratamiento objetivo para su integración a la investigación.
- El estudio es **relevante** para el entendimiento del fenómeno de madurez de LC en la GPC y permite el planteamiento de conceptos, definiciones y aportes al estado del conocimiento en LC.
- El problema de investigación fue abordado cuidadosamente apoyado en la teoría y desarrollo del conocimiento en la temática del desarrollo de LC en el sector de la construcción y específicamente de LC en la GPC, lo que garantiza la **concordancia teórico-epistemológica**.

• Consideraciones finales

A partir del trabajo realizado en el desarrollo de esta investigación, que incluye la revisión de la literatura y la interacción con los expertos, se reitera que el uso de LC, como el Sistema de Producción de Proyectos de Construcción, es una adecuada elección para las organizaciones de construcción en el desarrollo del proyecto de construcción.

Aún se dispone de pocas alternativas de evaluación del desempeño de LC. Las existentes se enfocan principalmente en la fase de construcción y pocas en la organización. Sin embargo, es importante que se disponga de una herramienta que permita evaluar la madurez de LC en la GPC más que en la organización. Una organización se puede evaluar con herramientas empresariales, sin embargo, el proceso de GPC es particular para el sector de construcción, por lo que contar con una herramienta de evaluación contextualizada aporta en la evolución hacia procesos más maduros en la GPC y en la organización misma.

Con el SLC-EModel se conoce el estado de madurez y se propone la estrategia para avanzar hasta obtener la madurez de LC en la GPC. Avanzar hacia niveles mayores de madurez va desarrollando capacidad en la organización y en la GPC para mejorar la eficiencia de la producción, además de desarrollar un lenguaje común, un pensamiento sistémico, así como el desarrollo y el mejoramiento del sistema de producción con enfoque en el cliente.

El SLC-EModel fue construido y validado para ofrecer un modelo que evaluara el estado de madurez del alcance de LC en la GPC, considerando los atributos precisos que orientan la evolución de la madurez de LC. Por lo que se puede afirmar que la comunidad LC ahora dispone de una herramienta útil para contribuir a la mejora de la eficiencia de la GPC, que considere el cumplimiento de la oferta de valor como el principal concepto que mueve el sistema. Este modelo se considera un estándar con el que se pueden conducir los procesos de implementación y de madurez de LC.

RECOMENDACIONES PRÁCTICAS PARA USAR EL SLC-EMODEL⁸

Las siguientes son orientaciones para la implementación del SLC-EModel en la evolución de LC en la GPC en las tres fases de aplicación del modelo:

1. Desarrollar un proceso de evolución de LC en la GPC. Esta función debe desempeñarla la Alta Dirección.
2. Definir los resultados esperados, los incentivos del logro del mejoramiento y la forma de obtención de los resultados. Esta decisión debe estar a cargo de la Alta Dirección.
3. Constituir el Sistema de Evolución de la Madurez de LC en la GPC como política de la Alta Dirección.
4. Constituir el sistema de información y comunicación para la aplicación del SLC-EModel.
5. Constituir los equipos de personas para la aplicación del modelo.
6. Entrenar a cada persona de los equipos en el conocimiento y uso del SLC-EModel.
7. Disponer para cada persona de la GPC el acceso al Sistema de Información y Comunicación para el proceso de autoevaluación con fines de evolución.
8. Evaluar la madurez de LC en la GPC con el uso del SLC-MM, para lo cual se debe:
 - a. Evaluar los atributos del modelo con uso de SLC-MAET. En el desarrollo de esta evaluación, se debe realizar la evaluación del subnivel de madurez de cada atributo.
 - b. Calificar la madurez con ayuda del SLC-QM y obtener los ILM y el IGM.
9. Elaborar los perfiles de madurez, tanto para FM como para el IGM, a partir de la calificación, y representarlos en diagramas de radar.
10. Definir el índice global de madurez objetivo (IGM_o).

⁸ Cualquier requerimiento respecto del uso del SLC-EModel, por favor contactar a la autora:
sandra.cano@correounivalle.edu.co - Universidad del Valle, Sede Meléndez - Escuela de Ingeniería Civil y Geomática - Calle 13 n.o 100-00 Edificio E48 Oficina 2022 Teléfono +57 2 3212100 Ext. 7231 - Cali, Colombia

11. Identificar las diferentes combinaciones de los atributos.
12. Seleccionar las combinaciones cuya cercanía con el nivel de madurez actual no difiera en más de un nivel.
13. Identificar la combinación de atributos que responda a la capacidad de la organización para adelantar la evolución hacia el IGM_e.
14. Formular el Plan Estratégico de Evolución.
15. Decidir la mejor configuración de la evolución de atributos que los acerque al IGM_o. Esta decisión está a cargo de la Alta Dirección, con ayuda de los equipos del sistema.
16. Formular el Plan Estratégico de Evolución.
17. Formular el Plan de Seguimiento y Control a la Implementación.
18. Implementar el Plan de Evolución.
19. Evaluar la efectividad de la implementación del Plan Maestro de Evolución.
20. Realizar una nueva aplicación del SLC-EModel.

TRABAJOS FUTUROS

Una vez se cuenta con el SLC-EModel, se ofrece la posibilidad para dar continuidad a este trabajo y a otros que han sido identificados al paso por cada temática estudiada.

1. La primera investigación es el desarrollo de la Herramienta de Evaluación de Madurez de Atributos (SLC-MAET) y del Modelo de Madurez (SLC-MM). Esta herramienta deberá contener la información que permita identificar con precisión, reduciendo la subjetividad en la evaluación de los atributos y el nivel de madurez que alcanza cada atributo. En este sentido, las características de los atributos deben ser definidas con detalle, así como los indicadores apropiados. Estos indicadores serán la base para el seguimiento del mejoramiento hacia un mayor nivel de madurez.
2. La evaluación de los atributos es una oportunidad para estudiar las mejores prácticas relacionadas con el proceso de implementación de LC.
3. Realizar una implementación del SLC-EModel en diferentes empresas, tanto en el orden nacional como internacional, cuyo nivel de avance en la implementación de LC sea notable. A partir de esta implementación, validar en campo el modelo para posteriormente aplicarlo en organizaciones con menores niveles de madurez, para establecer diferencias y similitudes en el proceso de evolución.
4. Desarrollar un sistema de información que soporte la evaluación de madurez y la estrategia de evolución. Desarrollar un sistema de recolección diario de información para alimentar constantemente el modelo, de tal manera que se obtengan indicadores tanto de proceso como de resultado para toma de decisiones y para el seguimiento constante al proceso de evolución.
5. Desarrollar un sistema de entrenamiento de profesionales en el modelo para fortalecer la implementación en las organizaciones, así como propiciar la fortaleza para la autoevaluación con ayuda del modelo.
6. Evaluar el modelo de evolución para obtener posteriores versiones del mismo. Esto lleva a prever que la mejora del modelo en sí mismo es un proceso de investigación para lograr cada vez un mejor modelo que se ajuste más a las condiciones y necesidades de la

evolución de la madurez que se vayan identificando, luego de estudiar las mejores prácticas en la utilización del modelo para la evolución.

7. Con la información que dio origen al SLC-EModel, se puede cimentar el desarrollo de investigaciones con métodos inteligentes, el uso de algoritmos que aprenden, como el uso de redes neuronales artificiales (RNA) que aprendan de las configuraciones que se irán identificando en cada proceso de evaluación y evolución.
8. Si se dispone de la herramienta, una aplicación muy útil es identificar los perfiles de madurez y enseñar a una red inteligente cuáles son los comportamientos lógicos de los atributos en el sistema, para que más adelante, al integrar evaluaciones reales, se avance hacia estrategias más inteligentes de evolución. Estrategias similares a la propuesta en esta investigación, donde a partir de la evaluación y calificación de la madurez y de la realidad de la organización, se pueda estructurar un plan de mejoramiento para avanzar hacia el siguiente nivel.
9. Para la selección de la mejor opción de evolución, la más cercana a la realidad de la organización, se requiere del desarrollo de un modelo matemático que identifique dicha opción, partiendo de la calificación de la madurez y la capacidad de la organización para atender los requerimientos de avance de cada atributo en el modelo.
10. Estudiar la aplicación del SLC-EModel como una herramienta para referenciar la GPC con la utilización de LC entre organizaciones del sector.
11. Estudiar la aplicación del SLC-EModel como una herramienta para referenciar la GPC con la utilización de LC entre proyectos de la misma compañía.
12. Precisar los valores de las relaciones identificadas en el SEM, comparándolos con la obtención de datos reales. Esto permite entender la diferencia o similitud entre el modelo conceptual y el desempeño real de todas las relaciones en el sistema.
13. El SLC-EModel tiene involucrados diferentes submodelos que deben ser evidenciados para que el proceso de evolución permita revelar el desempeño de estos submodelos e integrarlos a las expectativas de evolución de la GPC. Por ejemplo, se vislumbran submodelos de Calidad, Seguridad en Construcción, Gestión Ambiental y Gestión

Contractual. Estos submodelos emergen del SLC-EModel y evolucionan en la medida en que el modelo principal evoluciona.

14. Estudiar la aplicación del Last Planner System (LPS) para la planificación y control de la ejecución del SLC-EModel, así como el seguimiento de la implementación de la mejora del Plan de Acción de la Evolución de la Madurez de LC en la GPC.
15. Desarrollar los índices de madurez de las categorías del modelo. Al nivel de categorías se construye un modelo de segundo orden y si se desea conocer el IGM, este se construiría a partir de los índices de categoría, lo que daría origen a un modelo de tercer orden.
16. Desarrollar una aplicación para la identificación de la mejor combinación de atributos. Encontrar una ruta con la menor cantidad de atributos a intervenir es una ruta conformada por las cargas factoriales y los valores de β que ofrecen mayores efectos en el alcance de la madurez. Esto puede implicar un proceso de optimización a partir de la economía del modelo para alcanzar rápidamente la madurez con la menor cantidad de atributos intervenidos.
17. Este modelo puede ser adaptado a las necesidades de diferentes organizaciones de construcción, toda vez que el modelo es aplicable tanto a la madurez de Lean Construction en la GPC, como en la identificación de la madurez de procesos tanto de manufactura como de servicios en distintos entornos.
18. Este modelo puede ser adaptado a las necesidades de la organización de construcción para responder a las particularidades del proceso de producción. Puede ser usado para evaluar una o todas las fases del desarrollo del proyecto.
19. Ampliar la base de consulta a expertos con el fin de estudiar el comportamiento del modelo con un mayor número de datos.
20. Estudiar la sostenibilidad de la implementación de LC en la GPC a partir del uso del SLC-EModel.

PRODUCCIÓN ACÁDEMICA

Durante el doctorado se presentaron varios resultados de investigación para ser difundidos entre la comunidad académica y profesional. De igual manera, de esta investigación se derivaron trabajos de grado de estudiantes de pregrado y un trabajo de investigación de un estudiante de maestría. La investigadora realizó cinco estancias de investigación en cuatro universidades, una nacional y tres internacionales.

Artículos en revistas de investigación

Cano, S. y Rubiano, O. (2015). Modelo dinámico para evaluar el flujo de la gestión de proyectos de construcción: estudio de caso en infraestructura universitaria pública. *Heurística*, 17, 21-33.

Cano, S., Botero, L. y Rivera, L. (2017). Evaluación del desempeño de Lean Construction. *Espacios*, 38(39), 30.

Artículos en conferencias internacionales referenciadas en las memorias

Cano, S. y Rubiano, O. (2015). Estudio de factores que inciden en el flujo de la gestión de ejecución de proyectos de construcción de infraestructura universitaria. *XI Congreso Latinoamericano de Dinámica de Sistemas*. Universidad de Monterrey. Monterrey, México. 6-8 noviembre, 2015.

Cano, S., Delgado, J., Botero, L., & Rubiano, O. (2015). Study of Barriers and Success Factors in the Implementation of Lean Construction. *Exploration in a Pilot Context. IGLC23* Perth, Australia.

Cano, S., Fajardo, M., Botero, L. y Rivera, L. (2015). Entornos y sistemas de producción en construcción. Relación con la evolución de la aplicación de Lean Construction en Colombia. *Sibragec-Elagec 2015*. Universidad de São Carlos, 7-9 de octubre, São Carlos, Brasil.

Cano, S., Delgado, J., Botero, L. y Rivera, L. (2015). Barreras y factores de éxito que impactan la implementación de Lean Construction. *Sibragec-Elagec 2015*. Universidad de São Carlos, 7-9 de octubre, São Carlos, Brasil.

Cano, S. y Rivera, L. (2015). Modelo Sistémico de la Madurez en la Aplicación de Lean en la Gestión de Proyectos de Construcción. *Sibragec-Elagec 2015*. Universidad de São Carlos, 7-9 de octubre, São Carlos, Brasil.

Cano, S., Casanova, A. y Rivera, L. (2016). Last Planner System en la planeación y control del proyecto de construcción. *III Congreso Internacional de Industria y Organizaciones “Gestión de Cadenas de Abastecimiento en un Mundo Cambiante”*. Santiago de Cali, Colombia.

Cano, S., Erazo, D., Rivera, L. y Botero, L. (2016). Exploración de la aplicación de la filosofía Lean Construction en empresas constructoras colombianas. *VII Elagec – SEIN2CO Nuevas Tendencias en la Construcción Sostenible. Elagec 2016*. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Mano, A., Gouvea da Costa, S., Pinheiro de Lima, E., & Cano, S. (2018). Use of the Lawshe Technique to Validate the Questionnaire Items on Barriers that Impede the Implementation of Lean Construction. *The 9th International Conference on Production Research – Americas 2018*. Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia.

Trabajo de profundización, Maestría en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Civil, Orientación Construcciones

Bonilla, A. (2017). *Estudio de la variabilidad en la implementación del Last Planner System (LPS) en proyectos que adoptan la herramienta por primera vez* (Tesis de Maestría en Ingeniería, énfasis en Ingeniería Civil, Orientación Construcciones). Universidad del Valle.

Trabajos de grado de pregrado

Delgado, J. (2015). *Identificación preliminar de factores críticos en la implementación de la filosofía Lean Construction en proyectos de construcción en Colombia* (Trabajo de grado Ingeniería Civil). Universidad del Valle.

Escobar, L. M. y Pérez, E. I. (2015). *Caracterización de los entornos y sistemas de producción de proyectos de construcción de edificaciones en Colombia y su relación con la aplicación de Lean Construction* (Trabajo de grado Ingeniería Industrial). Universidad del Valle.

Erazo, A. D. (2018). *Estado de la aplicación de Lean Construction en empresas constructoras en Colombia* (Trabajo de grado Ingeniería Civil). Universidad del Valle.

Buchelli, A. A. (2019). *Uso de redes neuronales artificiales para la evaluación de Lean Construction en la Gestión de Proyectos de Construcción* (Trabajo de grado Ingeniería Civil). Universidad del Valle. Distinción Tesis Laureada.

Gonzalez, L. E. (2019). *Evaluación No Lineal de la Madurez de Lean Construction utilizando Redes Neuronales Artificiales*. (Trabajo de grado Ingeniería Civil). Universidad del Valle.

Estancias de investigación

Universidad Eafit, Medellín, Colombia. Grupo de Investigación en Gestión de la Construcción (GESCON). Del 20 de julio de 2014 al 30 de junio de 2015.

Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile. Centro de Excelencia en Gestión de la Producción (GEPUC). Del 6 de abril al 5 de mayo de 2015.

Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, Chile. Centro de Excelencia en Gestión de la Producción (GEPUC). Del 19 de septiembre al 7 de octubre de 2016.

Universidad Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Núcleo Orientado para a Inovação da Edificação (NORIE). Del 10 al 29 de octubre de 2016.

Pontificia Universidad Católica de Perú, Lima, Perú. Grupo de Gestión y Tecnología en la Construcción de Edificaciones y Obras Civiles (GETEC). Del 21 de noviembre al 16 de diciembre de 2016.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdimomunova, L., & Valerdi, R. (2010). An organizational assessment process in support of enterprise transformation. *Information Knowledge Systems Management*, 9, 175-195. <https://doi.org/10.3233/IKS-2010-0165>
- Aiken, L. (1985). Three Coefficients for Analyzing the Reliability and Validity of Ratings. *Educational and Psychological Measurement*, 45.
- Aiken, L. R. (1980). Content validity and reliability of single items or questionnaires. *Educational and Psychological Measurement*, 40(4), 955-959. <https://doi.org/10.1177/001316448004000419>
- Alarcón, L. F., Diethelm, S., Rojo, O., & Calderón, R. (2005). Assessing the impacts of implementing lean construction. In *13th International Group for Lean Construction Conference, IGLC 13*, July 19, 2005 - July 21, 2005 (pp. 387-393). Sydney, NSW, Australia: The International Group for Lean Construction. Retrieved from https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_6e3d60139f8fc2f19M64312061377553&database=cpx
- Alarcón, L. F. L., Diethelm, S., Rojo, O., & Calderón, R. (2008). Assessing the impacts of implementing lean construction. *Revista Ingeniería de Construcción*, 23(1), 26-33. Retrieved from <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ric/v23n1/art03.pdf>
- Almeida, J. C., & Salazar, G. F. (2003). Strategic Issues in Lean Construction. In *11th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Virginia, USA. Retrieved from <https://iglcstorage.blob.core.windows.net/papers/attachment-bad591f4-65d5-4484-b3a7-e98aa97ff354.pdf>
- AlSehaimi, A., Koskela, L., & Tzortzopoulos, P. (2013). Need for alternative research approaches in construction management: Case of delay studies. *Journal of Management in Engineering*, 29(4), 407-413. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000148](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000148)

- Anaman, K. A., & Osei-Amponsah, C. (2007). Analysis of the causality links between the growth of the construction industry and the growth of the macro-economy in Ghana. *Construction Management and Economics*, 25(9), 951-961. <https://doi.org/10.1080/01446190701411208>
- Andersen, E. S., & Jessen, S. A. (2003). Project maturity in organisations. *International Journal of Project Management*, 21(6), 457-461. [https://doi.org/10.1016/S0263-7863\(02\)00088-1](https://doi.org/10.1016/S0263-7863(02)00088-1)
- Anderson, J. C., & Gerbing, D. W. (1984). The effect of sampling error on convergence, improper solutions, and goodness-of-fit indices for maximum likelihood confirmatory factor analysis. *Psychometrika*, 49(2), 155-173. <https://doi.org/10.1007/BF02294170>
- Ayarkwa, J., Agyekum, K., Adinyira, E., & Osei-Asibey, D. (2011). Barriers to successful implementation of Lean Construction in the Ghanaian Building Industry. *Journal of Construction*, 5(1), 3-11. Retrieved from <http://dspace.knust.edu.gh/bitstream/123456789/10837/1/BARRIERS%20TO%20SUCCESSFUL%20IMPLEMENTATION%20OF%20LEAN%20CONST..pdf>
- Aziz, R. F., & Hafez, S. M. (2013). Applying Lean thinking in construction and performance improvement. *Alexandria Engineering Journal*, 52(4), 679-695. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.04.008>
- Ball, M., & Wood, A. (1995). How many jobs does construction expenditure generate? *Construction Management and Economics*, 13(4), 307-318. doi: 10.1080 / 01446199500000036
- Ballard, H. (2000). *The Last Planner System of Production Control* (PhD thesis Philosophy). School of Civil Engineering, Faculty of Engineering, The University of Birmingham. Retrieved from <http://www.leanconstruction.dk/media/15590/ballard2000-dissertation.pdf>
- Ballard, G. (2008). The Lean Project Delivery System: An Update. *Lean Construction Journal*, 8(Revision 1), 1-19.
- Ballard, G., & Howell, G. (1997). Implementing Lean Construction: Improving downstream

- performance. *Lean Construction*, 111-125.
- Ballard, G., & Howell, G. A. (2003). Competing Construction Management Paradigms. *Construction Research Congress, Winds of Change: Integration and Innovation in Construction, Proceedings of the Congress, 1*, 321-328. Retrieved from https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_fabe9fcb77f0aaeM77de19255120119&database=cpx
- Ballard, G., & Tommelein, I. (2012). Lean management methods for complex projects. *Engineering Project Organization Journal*, 2(1-2), 85-96. <https://doi.org/10.1080/21573727.2011.641117>
- Barahona, J. H. (1988). La empresa como organización: una propuesta de delimitación. *Anales de Estudios Económicos y Empresariales*, 3, 225-238. Retrieved from <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=785516>
- Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The Moderator-Mediator Variable Distinction in Social The Moderator-Mediator Variable Distinction in Social Psychological Research: Conceptual, Strategic, and Statistical Considerations. *Journal of Personality and Social Psychology*, 51(6), 1173-1182. <https://doi.org/10.1037/0022-3514.51.6.1173>
- Bashir, A., Suresh, S., Proverbs, D. G., & Gameson, R. (2010). Barriers towards the sustainable implementation of lean construction in the United Kingdom construction organisations. In *Arcom Doctoral Workshop. Sustainability Strategies In Construction* (pp. 1-8). United Kingdom: University of Wolverhampton. Retrieved from <http://www.arcom.ac.uk/-docs/workshops/2010-Wolverhampton.pdf>
- Bashir, A. M., Suresh, S., Proverbs, D., & Gameson, R. (2011). A critical, theoretical, review of the impacts of lean construction tools in reducing accidents on construction sites. *Association of Researchers in Construction Management, ARCOM 2011 - Proceedings of the 27th Annual Conference, 1*, 249-258. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84861031228&partnerID=tZOtx3y1>

- Becker, J., Knackstedt, R., & Pöppelbuß, J. (2009). Developing Maturity Models for IT Management. *Business & Information Systems Engineering*, 1(3), 213-222. <https://doi.org/10.1007/s12599-009-0044-5>
- Bernstein, H., & Jones, S. (2013). *Lean construction - Leveraging collaboration and advanced practices to increase project efficiency*. SmartMarketReport (Vol. 3). Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/21174905>
- Bertelsen, S. (2004). Lean Construction: where are we and how to proceed? *Lean Construction Journal*, 1(1), 46-69. Retrieved from https://www.leanconstruction.org/media/docs/lcj/V1_N1/LCJ_04_0009.pdf
- Bertelsen, S. (2017). *The Unruly Project*. Denmark: G. Ballard.
- Bon, R. (1992). The future of international construction: secular patterns of growth and decline. *Habitat International*, 16(3), 119-128.
- Briede, J. C., & Rebolledo, A. (2010). Nuevos modelos para la innovación en el diseño conceptual de productos: “Mapa del estado del arte de la propuesta conceptual”. *Theoria*, 19(1), 31-39. Retrieved from <http://www.ubiobio.cl/miweb/webfile/media/194/v/v19-1/2.pdf>
- Cano, S., Botero, L., & Rivera, L. (2017). Evaluación del desempeño de Lean Construction. *Espacios*, 38(39), 17. Retrieved from <http://www.revistaespacios.com/a17v38n39/a17v38n39p30.pdf>
- Cano, S., Delgado, J., Botero, L., & Rubiano, O. (2015a). Barreras y factores de éxito que impactan la implementación de Lean Construction. *Sibragec - Elagec 2015*. San Pablo, Brasil.
- Cano, S., Delgado, J., Botero, L., & Rubiano, O. (2015b). Barriers and Success Factors in Lean Construction Implementation - Survey in Pilot Context. En Seppänen, O., González, V. A. y Arroyo, P., *Proceedings for the 23rd Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 29-31 de julio de 2015, Perth, Australia.
- Cano, S. y Rivera, L. (2015). Modelo Sistémico de la Madurez en la Aplicación de Lean en la Gestión de Proyectos de Construcción. *Sibragec Elagec 2015 (Lc)*, 649-656. Retrieved from <http://www.infohab.org.br/sibraelagec2015/artigos/SIBRAGEC->

- Carro, R. y González, D. (2012). *El sistema de producción y operaciones. Administración de las operaciones, 1*. Retrieved from http://nulan.mdp.edu.ar/1606/1/01_sistema_de_produccion.pdf
- Carvalho, B. S. de (2008). *Proposta de uma Ferramenta de Análise e Avaliação das Construtoras em Relação ao uso da Construção Enxuta* (Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Construção Civil, Curso de Pós-Graduação em Construção Civil). Universidade Federal do Paraná - UFPR.
- Carvalho, F. de (2012). *Avaliação da Aplicação dos Princípios da Construção Enxuta em Empresas Construtoras*. Universidade Federal de São Carlos.
- Castka, P., Bamber, C. J., & Sharp, J. M. (2004). Benchmarking intangible assets: enhancing teamwork performance using self-assessment. *Benchmarking: An International Journal*, 11(6), 571-583. <https://doi.org/10.1108/14635770410566483>
- Chandra, H. (2015). Structural equation model for investigating risk factors affecting project success in Surabaya. *Procedia Engineering*. 125 (2015) 53-59. <https://doi:10.1016/j.proeng.2015.11.009>
- Chiavenato, I. (2008). *Gestión del Talento Humano* (3.^a ed). México: McGraw-Hill.
- Ciborra, C. U., & Hanseth, O. (1998). From tool to Gestell infrastructure From tool to. *Information Technology & People*, 11(4), 305-327. <https://doi.org/10.1108/09593849810246129>
- Cooke-Davies, T. J. (2004). Measurement of organizational maturity. In J. K. Slevin, D. P., Cleland, D. I. and Pinto (Eds.), *Innovations-Project management research*. Newtown Square: PMI.
- Cortez, D., Cortez, K., García, G., & Rodríguez, M. (2009). Factores determinantes en la implementación de Lean utilizando teoría psicosocial. *Innovaciones de Negocios*, 6(2), 173-188.
- Costa, E. N., Sartori, H., Santiago, M. V, Santos, P. R. dos, Santana, P. L., & Silva, R. B. da (2015). Evaluation of the use of the principles of lean construction in two companies

- in the construction sector in the municipality of Rondonópolis-MT. *Espacios*, 36(19), 11.
- Crespo, F. (2017). Qué es la Industria 4.0. s.l.: s.e.
- Cronbach, J. L. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrik*, 16(3), 297-298.
- Crosby, P. (1979). *Quality is Free, The Art of Making Quality Certain*. New York, NY: McGraw-Hill.
- Crosthwaite, D. (2000). The global construction market: a cross-sectional analysis. *Construction Management & Economics*, 18(5), 619-627. Retrieved from <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/014461900407428>
- Cruz, H., & Santos, D. (2015). Investigación do comportamento enxuto de empresas construtoras de médio porte. In *Sibragec Elagec 2015*. 7 a 9 de outubro, São Carlos, Brasil.
- Cupani, M. (2012). Análisis de Ecuaciones Estructurales: conceptos, etapas de desarrollo y un ejemplo de aplicación. *Revista Tesis*, 2(1), 136-156.
- Curtis, B., Hefley, B., & Miller, S. (2009). *People Capability Maturity Model (P-CMM) Version 2.0*. Pittsburgh, PA: Carnegie Mellon University - Software Engineering Institute. Retrieved from https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/TechnicalReport/2009_005_001_15095.pdf
- Deming, W. E. (1994). *La Nueva Economía para la industria, el gobierno y la educación*. Madrid: Díaz de Santos.
- Despradel, I., Guerrero, C., Jourdain, M., López, J., Núñez, A., & Oliver, C. (2011). Lean Construction: implicaciones en el uso de una nueva filosofía, con miras a una mejor administración de proyectos de Ingeniería Civil en República Dominicana. *Ninth LACCEI Latin American and Caribbean Conference (LACCEI'2011), Engineering for a Smart Planet, Innovation, Information Technology and Computational Tools for Sustainable Development*. Agosto 3-5, 2011, Medellín, Colombia.

- Diekmann, J. E., Krewedl, M., Balonick, J., Stewart, T., & Won, S. (2004). *Application of Lean Manufacturing Principles to Construction. Report 191. Construction Industries Institute*. Austin, TX: University of Texas.
- Dwyer, F. R., & Oh, S. (1987). Output Sector Munificence Effects on the Internal Political Economy of Marketing Channels. *Journal of Marketing Research*, 24(4), 347-358. <https://doi.org/10.2307/3151382>
- Ehsan, N., Perwaiz, J., Arif, J., Mirza, E., Ishaque, A. (2010) CMMI / SPICE based Process Improvement. Proceedings of the 2010 IEEE ICMIT. 859-862
- Etges, B., Saurin, T., & Bulhões, I. R. (2013). A protocol for assessing the use of Lean Construction practices. *Proceedings for the 21th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84903286965&partnerID=tZOtx3y1>
- Fearne, A., & Fowler, N. (2006). Efficiency versus effectiveness in construction supply chains: The dangers of “lean” thinking in isolation. *Supply Chain Management: An International Journal*, 11(4), 283-287. <https://doi.org/10.1108/13598540610671725>
- Fisher, J. (2005). *Cómo incentivar a los empleados*. Londres: Kogan Page.
- Formoso, C. T., Sommer, L., Koskela, L., & Isatto, E. L. (2011). An Exploratory Study on the Measurement and Analysis of Making-Do in Construction Sites. En *IGLC 19*. Lima, Perú. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4753.1043>
- Gaete, Á. (septiembre 26 de 2016). *Implementación efectiva de Lean en la Gestión de producción de proyectos de construcción*. Sandra Cano/Entrevistadora. Santiago de Chile.
- Ganesan, S. (2000). *Employment Technology and Construction Development*. Farnham, UK: Ashgate Pub.
- Garay-Hernández, R., Espinoza, A., Martínez-Martínez, A., & Castro-Careaga, L. (2013). Estudio de mapeo sistematizado sobre la estimación de valor del producto software. En *Congreso Internacional de Investigación e Innovación en Ingeniería de Software*

2013. 2 al 4 de octubre, Xalapa, Veracruz.

- García, J. L. (2011). Factores relacionados con el éxito del mantenimiento productivo total. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, 60, 129-140.
- Gill, T. G., & Hevner, A. R. (2013). A Fitness-Utility Model for Design Science Research. *ACM Transactions on Management Information Systems*, 4(2), 1-24. <https://doi.org/10.1145/2499962.2499963>
- Glazer, H., Dalton, J., Anderson, D., Konrad, M., & Shrum, S. (2008). *CMMI or Agile: Why Not Embrace Both! (CMU/SEI-2008-TN-003)*. Software Engineering Institute. Carnegie Mellon University. <https://doi.org/10.1109/AGILE.2006.30>
- Goksen, Y., Cevik, E., & Avunduk, H. (2015). A Case Analysis on the Focus on the Maturity Models and Information Technologies. *Procedia Economics and Finance*, 19(15), 208-216. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)00022-2)
- González, V., Alarcón, L. F., & Molenaar, K. (2009). Multiobjective design of Work-In-Process buffer for scheduling repetitive building projects. *Automation in Construction*, 18(2), 95-108. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.05.005>
- Green, S. D., Harty, C., Elmualim, A. A., Larsen, G. D., & Kao, C. C. (2008). On the discourse of construction competitiveness. *Building Research and Information*, 36(5), 426-435. <https://doi.org/10.1080/09613210802076666>
- Gregor, S., & Jones, D. (2007). The Anatomy of Design Theory. *Journal of the Association for Information Systems*, 8(5), 312-335.
- Guirette, O. A. y Arroyo, A. (2011, octubre). El pensamiento sistémico y la construcción del conocimiento en organizaciones educativas. *Primer Congreso Latinoamericano de Ciencias Sociales: Los retos políticos, económicos y sociales de Latinoamérica en el siglo XXI*. Unidad Académica de Ciencias Sociales, Universidad Tecnológica de Zacatecas.
- Haenlein, M., & Kaplan, A. M. (2004). A Beginner's Guide to Partial Least Squares Analysis. *Understanding Statistics*, 3(4), 283-297. https://doi.org/10.1207/s15328031us0304_4

- Hair, J., Anderson, R. E., Tatham, R. L., & Black, W. (1999). *Análisis Multivariante* (5.^a ed.). Nueva York: Prentice Hall.
- Hamzeh, F. R., Morshed, F. A., Jalwan, H., & Saab, I. (2012). Is improvisation compatible with look ahead planning? An exploratory study. *IGLC 2012 - 20th Conference of the International Group for Lean Construction*. Retrieved from https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_535b5813d5a768c97M4b0a2061377553&database=cpx
- Herranz-Limón, D. (2015). *Measuring Lean Construction - A Performance measurement model supporting the implementation of Lean practices in the Norwegian construction industry*. Norwegian: Norwegian University of Science and Technology.
- Hevner, A. R. (2007). A Three Cycle View of Design Science Research. *Scandinavian Journal of Information Systems*, 19(2), 6.
- Hevner, A. R., March, S. T., Park, J., & Ram, S. (2004). Design Science in Information Systems Research. *MIS Quarterly*, 28(1), 75-105. <https://doi.org/10.2307/25148625>
- Hillebrandt, P. M. (2000). *Economic Theory and the Construction Industry* (3rd ed.). United Kingdom: Palgrave Macmillan.
- Hofacker, A., Oliveira, B. F. de, Gehbauer, F., Freitas, M. D. C. D., Mendes Jr., R., Santos, A., & Kirsch, J. (2008). Rapid Lean Construction-quality Rating model (LCR). In *Proceedings of IGLC16: 16th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84856651250&partnerID=tZOtx3y1>
- Howell, G. A. (1999). *What is Lean Construction. Proceedings Seventh Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. Berkeley, CA: UCLA.
- Huang, C., Liu, P., & Zhang, P. (2013). The Complexity Conceptual Model of Lean Construction. *Proceedings of 2013 4th International Asia Conference on Industrial Engineering and Management Innovation (IEMI2013)*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-40060-5_4

- Humphrey, W. S. (2002). Three process perspectives: Organizations, teams, and people. *Annals of Software Engineering*, 14(1-4), 39-72. <https://doi.org/10.1023/A:1020593305601>
- Hwang, S. M., & Yeom, H. (2009). Process Quality Levels of ISO / IEC 15504 , CMMI and K-model. *International Journal*, 3(1), 33-42. <https://doi.org/10.1109/SNPD.2009.87>
- Ibbs, C. W., & Kwak, Y. H. (2000). Assessing Project Management Maturity. *Project Management Journal*, 31(1), 32-43. <https://doi.org/10.1177/875697280003100106>
- Ive, G., & Gruneberg, S. L. (2000). *The Economics of the Modern Construction Sector*. United Kingdom: Palgrave Macmillan. <https://doi.org/10.1057/9780230510432>
- Jörekong, K. G., & Sörbom, D. (1993). *LISREL 8. Structural equation modelling with SIMPLIS command language*. Chicago: Scientific Software International.
- Jørgensen, B. (2006). *Integrating Lean Design and Lean Construction: Processes and Methods*. Kgs Lyngby: Tehcnical University of Denmark.
- Jünge, G. H., Kjersem, K., Shlopak, M., Alfnes, E., & Halse, L. L. (2015). From First Planner to Last Planner. In Umeda S., Nakano M., Mizuyama H., Hibino H., Kiritsis D., von Cieminski G. (Eds.), *Advances in Production Management Systems: Innovative Production Management Towards Sustainable Growth. APMS 2015. IFIP International Federation for Information Processing*, 460, 240-247. https://doi.org/10.1007/978-3-319-22759-7_28
- Kahn, J. H. (2006). Factor Analysis in Counseling Psychology Research, Training, and Practice: Principles, Advances, and Applications. *The Counseling Psychologist*, 34(5), 684-718. <https://doi.org/10.1177/0011000006286347>
- Kaplan, D. (2000). *Structural Equation Modeling: Foundations and Extensions* (Vols. 1-10). Thousand Oaks, CA: Sage: Advanced Quantitative Techniques in the Social Sciences Series. doi: 10.4135 / 9781452226576
- Khoshgoftar, M., & Osman, O. (2009). Comparison of Maturity Models School of Housing, Building and Planning. ICCSIT 2009. *2nd IEEE International Conference on*

Computer Science and Information Technology.
<https://doi.org/10.1109/ICCSIT.2009.5234402>

Kim, D., & Park, H.-S. (2006). Innovative construction management method: Assessment of lean construction implementation. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 10(6), 381-388. <https://doi.org/10.1007/BF02823976>

Kline, R. B. (2011). *Principles and practice of structural equation modeling. Structural Equation Modeling* (3th ed.). New York: The Guilford Press.
<https://doi.org/10.1038/156278a0>

Kock, N. (2017). *WarpPLS User Manual: Version 6.0*. Laredo, Texas USA: ScriptWarp Systems. Retrieved from
http://cits.tamtu.edu/WarpPLS/UserManual_v_6_0.pdf#page=77

Koehn, E., & Brown, G. (1986). International Labor Productivity Factors. *Journal of Construction Engineering and Management*, 112(2), 299-302.

Koskela, L. (1992). *Application of the New Production Philosophy to Construction*. Stanford, CA: Stanford University.

Koskela, L. (2000). *An Exploration towards a Production Theory and its Application to Construction*. Finland: Technical Research Centre of Finland.

Koskela, L. (2004). Making-do - The eighth category of waste. In *12th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 3-5 August 2004, Helsingor, Denmark.

Koskela, L., & Ballard, G. (2012). Is production outside management? *Building Research & Information*, 40(6), 724-737. <https://doi.org/10.1080/09613218.2012.709373>

Koskela, L., & Howell, G. (2002). The underlying theory of project management is obsolete. *IEEE Engineering Management Review*, 36(2), 22-34.
<https://doi.org/10.1109/EMR.2008.4534317>

Koskela, L., Howell, G., Ballard, G., & Tommelein, I. D. (2002). The foundations of lean construction. In *Design and Construction: Building in Value* (pp. 211-226). Oxford, UK: Butterworth Heinemann. <https://doi.org/10.1016/j.psychres.2008.06.026>

- Liker, J. K. (2011). *Toyota: Cómo el fabricante más grande del mundo alcanzó el éxito*. Bogotá: Norma.
- Liu, M., Ballard, G., & Ibbs, W. (2011). Work Flow Variation and Labor Productivity: Case Study. *Journal of Management in Engineering*, 27(4), 236-242. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000056](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000056)
- Lockamy, A., & McCormack, K. (2004). Linking SCOR planning practices to supply chain performance. *International Journal of Operations & Production Management*, 24(12), 1192-1218. <https://doi.org/10.1108/01443570410569010>
- Lowe, J. (2003). *Construction Economics*. Retrieved from www.callnetuk.com/home/johnlowe70/
- Maloney, W. (1983). Productivity Improvement: The Influence of Labor. *Journal of Construction Engineering and Management*, 109(3).
- Mann, D. (2005). *Creating a Lean Culture: tools to sustain lean conversions*. New York: Productivity Press.
- Mano, A., Lima, E. P. de, Costa, S. E. G. da, & Cano, S. (2018). Identifying critical barriers to implementing Lean Construction using a Lawshe study. In *International Conference on Production Research-ICPR Americas 2018, The 9 th International Conference on production research- Americas 2018*, Bogotá.
- Manson, N. J. (2006). Is operations research really research? *Orion*, 22(2), 155-180. <https://doi.org/10.5784/22-2-40>
- March, S. T., & Smith, G. F. (1995). Design and natural science research on information technology. *Decision Support Systems*, 15(4), 251-266. [https://doi.org/10.1016/0167-9236\(94\)00041-2](https://doi.org/10.1016/0167-9236(94)00041-2)
- March, S. T., & Storey, V. C. (2008). Design Science in the information systems discipline: An Introduction to Special Issue on Design Science Research. *Management Information Systems Research Center, University of Minnesota*, 32(4), 725-730.
- Martínez, P., González, V., & Fonseca, E. da (2009). Integración conceptual Green-Lean en el diseño, planificación y construcción de proyectos. *Revista Ingeniería de*

Construcción, 24(1), 5-32. Retrieved from http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732009000100001&lang=pt

Miltenburg, J. (1995). *Manufacturing Strategy*. Portland: Productivity Press.

Moorman, C., & Miner, A. S. (1998). Organizational Improvisation and Organizational Memory. *Academy of Management Review*, 23(4), 698-723.

Mossman, A. (2009). Creating value: a sufficient way to eliminate waste in lean design and lean production. *Lean Construction Journal*, 13-23. Retrieved from https://www.leanconstruction.org/media/docs/ktll-add-read/Creating_Value_A_Sufficient_Way_To_Eliminate_Waste_In_Lean_Design_And_Lean_Production.pdf

Mossman, A. (2018). What Is Lean Construction- Another Look. *Proc. 26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Chennai, India. <https://doi.org/10.24928/2018/0309>

Myšková, R. (2009). Satisfaction of Financial Managers with Accounting Information System. *Proceedings of the 3Rd International Conference on Management, Marketing and Finances*, 76-81.

Nam, C. H., & Tatum, C. B. (1988). Major characteristics of constructed products and resulting limitations of construction technology. *Construction Management & Economics*, 6(2), 133-147. <https://doi.org/10.1080/01446198800000012>

Nesensohn, C. (2014). *An innovative framework for assessing lean construction maturity* (Doctoral thesis). Liverpool John Moores University.

Nesensohn, C. (2017). A Lean Construction Maturity Model for Organizations. In *25th Annual Conference of the International Group for Lean Construction*. 9-12 Jul 2017, Heraklion, Greece.

Nesensohn, C., & Bryde, D. J. (2012). A Review of the Evolution of Lean Construction. *Creative Construction Conference*. June 30 - July 3, 2012, Budapest, Hungary.

Nesensohn, C., Bryde, D., Ochieng, E., & Fearon, D. (2014). Maturity and maturity models

- in lean construction. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 14(1), 45-59. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84897054944&partnerID=40&md5=fcd6fa0c6b2b15ac7349293f5b40c246>
- Ogunbiyi, O., Oladapo, A., & Goulding, J. (2011). Innovative value management: Assessment of lean construction implementation. In *COBRA 2011 - Proceedings of RICS Construction and Property Conference*. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84874962842&partnerID=tZOtx3y1>
- Ogunbiyi, O., Oladapo, A., Goulding, J., Oyedolapo, O., Jack Steven, G., & Adebayo, O. (2014). An empirical study of the impact of lean construction techniques on sustainable construction in the UK. *Construction Innovation: Information, Process, Management (Q2)*, 14(1), 88-107. <https://doi.org/10.1108/CI-08-2012-0045>
- Ohno, T. (1988). *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. New York: Productivity Press.
- Olhager, J. (2003). Strategic positioning of the order penetration point. *International Journal of Production Economics*, 85(3), 319-329. [https://doi.org/10.1016/S0925-5273\(03\)00119-1](https://doi.org/10.1016/S0925-5273(03)00119-1)
- Paulk, M., Curtis, B., Chrissis, M., & Weber, C. (1996). *The Capability Maturity Model for Software*. Pittsburgh, Pennsylvania: Software Engineering Institute - Carnegie Mellon University. Retrieved from https://resources.sei.cmu.edu/asset_files/TechnicalReport/1993_005_001_16211.pdf
- Pavez, I., & Alarcón, L. F. (2007). Lean construction professional's profile (LCPP): Understanding the competences of a lean construction professional. In *Lean Construction: A New Paradigm for Managing Capital Projects - 15th IGLC Conference* (pp. 453-464). The International Group for Lean Construction. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-57749085002&partnerID=tZOtx3y1>
- Pavez, I., & Alarcón, L. F. (2012). The Lean Construction Professional Profile (LCPP):

- Implementation in Chilean Contractor Organizations. *Global Perspective on Engineering Management*, 1(3), 59-66.
- Pavez, I., & Alarcón, L. F. (2006). Qualifying people to support lean construction in contractor organizations. In *Understanding and Managing the Construction Process: Theory and Practice - 14th Annual Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC-14* (pp. 513-524). Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84866139994&partnerID=tZOtx3y1>
- Pavez, I., González, V., & Alarcón, L. F. (2010). Improving the Effectiveness of New Construction Management Philosophies using the Integral Theory. *Revista de la Construcción*, 9(1), 26-38.
- Peffer, K., Tuunanen, T., Rothenberger, M. A., & Chatterjee, A. S. (2008). A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. *Journal of Management Information Systems*, 24(3), 45-77.
- Perkins, L. N., Abdimomunova, L., Valerdi, R., Shields, T., & Nightingale, D. (2010). Insights from enterprise assessment: How to analyze LESAT results for enterprise transformation. *Information Knowledge Systems Management*, 9(3/4), 153-174. <https://doi.org/10.3233/IKS-2010-0164>
- Pons, J. F. (2014). *Introducción a Lean Construction*. Madrid: Fundación Laboral de la Construcción.
- Ramírez, J. M. (2009). Planeación de la implantación de sistemas de información en las PYME mexicanas. En *Primer Congreso Internacional en México sobre la MIPYME: El impacto de la investigación académica en el desarrollo de la MIPYME*, 1-19.
- Rangelova, F. (2015). *Fundamentals of Economics in Sustainable Fundamentals of Economics in Sustainable Construction*. Bulgaria: Bultest Standard.
- Rindskopf, D., & Rose, T. (1988). Some Theory and Applications of Confirmatory Second-Order Factor Analysis. *Multivariate Behavioral Research*, 23(1), 51-67. doi: 10.1207 / s15327906mbr2301_3

- Rivera, L., & Manotas, D. (2014). Lean manufacturing in the developing world: Methodology, case studies and trends from Latin America. In J. L. García-Alcaraz, A. A. Maldonado-Macías, & G. Cortes-Robles (Eds.), *Lean Manufacturing in the Developing World: Methodology, Case Studies and Trends from Latin America*. Switzerland: Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-04951-9>
- Rivera, L. (2016). La madurez de LC. Sandra Cano/Entrevistadora. Cali.
- Sacks, R., Koskela, L., Dave, B. A., & Owen, R. (2010). Interaction of Lean and Building Information Modeling in Construction. *Journal of Construction Engineering and Management*, 136(9), 968-980. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000203](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000203)
- Sainath, Y., Koshy, V., & Raghavan, N. (2018). Framework for Progressive Evaluation of Lean Construction Maturity Using Multi-Dimensional Matrix. *26th Annual Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC)*. Chennai, India. <https://doi.org/10.24928/2018/0416>
- Salem, O., Solomon, J., Genaidy, A., & Minkarah, I. (2006). Lean construction: From theory to implementation. *Journal of Management in Engineering*, 22(4), 168-175. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0742-597X\(2006\)22:4\(168\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0742-597X(2006)22:4(168))
- Salem, O., & Zimmer, E. (2005). Application of lean manufacturing principles to construction. *Lean Construction Journal*, 2(2), 51-54. Retrieved from http://www.leanconstruction.org/media/docs/lcj/V2_N2/LCJ_05_011.pdf
- Salvatierra, J. L., Alarcón, L. F., López, A., & Velásquez, X. (2015). Lean Diagnosis for Chilean Construction Industry- Towards More Sustainable Lean Practices and Tools. *23rd Ann. Conf. of the Int'l. Group for Lean Construction*. July 29-31, Perth, Australia.
- Sarhan, S., & Fox, A. (2012). Trends and challenges to the development of a lean culture among uk construction organisations. In *20th Conference of the International Group for Lean Construction (IGLC 2012)*. Retrieved from https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_535b5813d5a7

68c97M4b1c2061377553&database=cpx

- Sarhan, S., & Fox, A. (2013a). Barriers to implementing lean construction in the UK construction industry. *The Build & Human Environment Review*, 6, 1-17.
- Sarhan, S., & Fox, A. (2013b). Performance measurement in the UK construction industry and its role in supporting the application of lean construction concepts. *Australasian Journal of Construction Economics and Building*, 13(1), 23-35. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84875155726&partnerID=40&md5=b9ddd7669a0caf3c26e7883099c4d797>
- Sarshar, M., Haigh, R., Finnemore, M., Aouad, G., Barrett, P., Baldry, D., & Sexton, M. (2000). SPICE: A business process diagnostics tool for construction projects. *Engineering, Construction and Architectural Management*, 7(3), 241-250. <https://doi.org/10.1108/eb021149>
- Šatanová, A., & Krajčířová, L. (2012). Application of Accounting and Reporting in a Cost-Oriented Quality Management in Wood- Processing Companies. *Drvna Industrija*, 63(4), 283-289. <https://doi.org/10.5552/drind.2012.1215>
- Senge, P. M., Klieiner, A., Roberts, C., R. B. Ross, & Smith., B. J. (1994). *The Fifth Discipline Fieldbook: Strategies and Tools for Building a Learning Organization*. New York, NY: Currency Doubleday.
- Shang, G. (2013). *The Toyota way model: an implementation framework for large chinese construction firms* (Doctoral thesis). Singapore: ScholarBank@NUS Repository. Retrieved from <http://scholarbank.nus.edu.sg/handle/10635/43610>
- Shang, G., & Pheng, L. (2012). The adoption of Toyota Way principles in large Chinese construction firms. *Journal of Technology Management in China*, 7(3), 291-316. <https://doi.org/10.1108/17468771311325185>
- Shingo, S. (1992). *The production management system: improving process functions*. Tokyo, Japan: Productivity Press.
- Siriwardena, M. L., Kagioglou, M., Jeong, K. S., Haigh, R., & Amaratunga, R. D. G. (2005). SPICE 3: Facilitating organisational process improvement through good practice sharing. In *2nd International Symposium* (pp. 434-448). Salford, UK.

- Soto, U. (2016). *Evaluación de la madurez de los principios Lean en proyectos de construccion* (Tesis de Magíster en Ciencias de la Ingeniería). Pontificia Universidad Católica de Chile.
- Stasiak-Betlejewska, R., & Potkány, M. (2015). Construction Costs Analysis and its Importance to the Economy. *Procedia Economics and Finance*, 34(15), 35-42. [https://doi.org/10.1016/S2212-5671\(15\)01598-1](https://doi.org/10.1016/S2212-5671(15)01598-1)
- Sun, M., Vidalakis, C., & Oza, T. (2009). A change management maturity model for construction projects. In R. Dainty (ed.), *Proceedings of the 25th Annual Association of Researchers in Construction Management* (2) Arcom, 803-812.
- Tapia, R. S., Daneva, M., Van Eck, P., & Wieringa, R. (2008). Towards a business-IT alignment maturity model for collaborative networked organizations. *Proceedings - IEEE International Enterprise Distributed Object Computing Workshop, EDOC*, 276-287. <https://doi.org/10.1109/EDOCW.2008.59>
- Tenenhaus, M., Vinzi, V. E., Chatelin, Y. M., & Lauro, C. (2005). PLS path modeling. *Computational Statistics and Data Analysis*, 48(1), 159-205. <https://doi.org/10.1016/j.csda.2004.03.005>
- Tezel, A., & Nielsen, Y. (2013). Lean construction conformance among construction contractors in Turkey. *Journal of Management in Engineering*, 29(3), 236-250. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000145](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000145)
- Thomas, H. R., Horman, M. J., Minchin, R. E., & Chen, D. (2003). Improving Labor Flow Reliability for Better Productivity as Lean Construction Principle. *Journal of Construction Engineering and Management*, 129(3), 251-261. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(2003\)129:3\(251\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(2003)129:3(251))
- Tortorella, G., & Fogliatto, F. (2013). Assessment of Organizational Maturity for Lean Change. *Sistemas & Gestão*, 8(4), 444-451. <https://doi.org/10.7177/sg.2013.v8.n4.a10>
- Tortorella, G. L., & Fogliatto, F. S. (2014). Method for assessing human resources management practices and organisational learning factors in a company under lean manufacturing implementation. *International Journal of Production Research*,

52(15), 4623-4645. <https://doi.org/10.1080/00207543.2014.881577>

- Vaishnavi, V., & Kuechler, B. (2007). *Design Science Research Methods and Patterns: Innovating Information and Communication Technology*. Ais. Boston, MA: Auerbach.
- Valente, C. P., Novaes, M. D. V., Mourão, C. A. M. D. A., Neto, J. D. P. B. (2012). Lean monitoring and evaluation in a construction site: A proposal of lean audits. In *20th Conference of the International Group for Lean Construction, IGLC 2012*. San Diego, CA: The International Group for Lean Construction. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84874474674&partnerID=40&md5=6308fbb3112b5c4455716385b730d6b1>
- Vera, D., & Crossan, M. (2004). Theatrical improvisation: Lessons for organizations. *Organization Studies*, 25(5), 727-749. <https://doi.org/10.1177/0170840604042412>
- Verjans, S. (2005). Bricolage as a way of life - Improvisation and irony in information systems. *European Journal of Information Systems*, 14(5), 504-506. <https://doi.org/10.1057/palgrave.ejis.3000559>
- Vieira, H. F. (2006). *Logística Aplicada à Construção Civil*. São Paulo: Pini.
- Vieira, L. C., Souza, L. O. de, & Amaral, M. T. (2012). Application of the rapid lean construction-quality rating model to engineering companies. *IGLC 2012 - 20th Conference of the International Group for Lean Construction*. Retrieved from https://www.engineeringvillage.com/share/document.url?mid=cpx_535b5813d5a768c97M4b4c2061377553&database=cpx
- Vilasini, N., Neitzert, T. R., & Rotimi, J. O. (2011). Correlation between Construction Procurement Methods and Lean Principles. *International Journal of Construction Management*, 11(4), 65-78. Retrieved from <https://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-80054988325&partnerID=40&md5=c7fba54d796546dc4f2fff80ce34ccb3>
- Wang, J., Xiao, J., Li, Q., & Li, K. (2011). Knowledge management maturity models: A systemic comparison. *Proceedings - 2011 4th International Conference on Information Management, Innovation Management and Industrial Engineering*,

- ICIII 2011, 3, 606-609. <https://doi.org/10.1109/ICIII.2011.420>
- Wendler, R. (2012). The maturity of maturity model research: A systematic mapping study. *Information and Software Technology*, 54(12), 1317-1339. <https://doi.org/10.1016/j.infsof.2012.07.007>
- Weston, R., & Gore, P. A. (2006). A Brief Guide to Structural Equation Modeling. *The Counseling Psychologist*, 34(5), 719-751. <https://doi.org/10.1177/0011000006286345>
- Wibowo, A. (2009). *The Contribution Of The Construction Industry To The Economy Of Indonesia: A Systemic Approach*. Civil Engineering Department, Diponegoro University, Indonesia. <https://doi.org/10.1024/0301-1526.32.1.54>
- Wiele, T., Brown, A., Millen, R., & Whelan, D. (2000). Improvement in Organizational Performance and Self-Assessment Practices by Selected American Firms. *Quality Management Journal*, 7(4).
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean Thinking: Banish Waste and Create Wealth in Your Corporation*. New York: Free Press.
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Roos, D. (1990). *The Machine That Changed the World*. New York: Free Press.
- Yi, W., & Chan, A. P. C. (2014). Critical review of labor productivity research in construction journals. *Journal of Management in Engineering*, 30(2), 214-225. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ME.1943-5479.0000194](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ME.1943-5479.0000194)

ANEXOS

Anexo 1.1

1.1. La investigación en ciencia del diseño

La Investigación en Ciencia del Diseño (DSR por sus siglas en Inglés) viene siendo aceptada por la comunidad que investiga temáticas relacionadas con la gestión de construcción y particularmente por la comunidad interesada en ampliar el conocimiento en Lean Construction (LC). Se trata de un tipo de investigación con capacidad para estudiar los fenómenos asociados con LC en el sector de construcción y desarrollar soluciones, científicamente fundamentadas, que puedan resolver problemas del mundo real apoyadas en la experiencia y el conocimiento práctico de los expertos en el tema de interés. Con el DSR se establece relación entre la teoría y la práctica, fortaleciendo lo que varios investigadores resaltan como, la relevancia de la investigación académica. A continuación, se presentan la metodología de investigación en DSR, que es la metodología escogida para el desarrollo de la investigación, para obtener el modelo de evolución de LC en la GPC (SLC-EModel).

Un proceso de investigación, de manera general, reúne un conjunto de procesos sistemáticos, críticos y empíricos que se aplican al estudio de un fenómeno o problema con los cuales a partir de su aplicación se emprende la búsqueda de conocimiento (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014). Se reconocen dos enfoques: el realismo, o enfoque cuantitativo y el constructivismo, o enfoque cualitativo. Aunque pertenecen a diferentes corrientes de pensamiento, ambos utilizan estrategias similares en la búsqueda de conocimiento. Entre las estrategias, según (Jr. y Yvonne Unrau, 2005) se cuentan: la observación y evaluación de fenómenos, la construcción de suposiciones a partir de las observaciones y evaluaciones, la demostración del fundamento de las suposiciones, la revisión del fundamento de las suposiciones con respecto de las pruebas y la proposición de estrategias para reafirmar las suposiciones y generar otras. Estos enfoques se pueden desarrollar de manera complementaria y es el investigador, dependiendo del contexto, la situación, los recursos disponibles, los objetivos y el problema de estudio, quien decide cuál de ellos usar (John, 2009), (Niglas, 2010) (John, 2009) (Creswell, 2013)

El enfoque cuantitativo es exigente y riguroso sobre la realización de la investigación de manera secuencial y probatoria, requiere de la medición de variables y el análisis de la información posterior a la definición de las preguntas de investigación o hipótesis. Este es el

enfoque más utilizado por la Ciencias Naturales debido a que con su ayuda se generaliza los fenómenos estudiados y es posible la repetición de los fenómenos estudiados.

De otra parte, el enfoque cualitativo obtiene la información de una forma diferente, recoge datos contextualizados en el entorno de la investigación y experiencias que amplían el entendimiento de la problemática y su solución. A diferencia del enfoque cuantitativo, la investigación cualitativa puede abordar las preguntas o hipótesis de investigación en cualquier momento de la recolección y el análisis de los datos con un punto de vista holístico de los fenómenos (Hernández et al., 2014). Este es el enfoque más usado en disciplinas humanísticas y aquellas relacionadas con la gestión entre otras.

Una investigación rigurosa debe ser capaz de generar nuevos conocimientos teóricos y usarlos para resolver problemas, de esta manera entregar resultados relevantes y aplicables para la práctica (Hodkinson y Hodkinson, 2001) (Holmström, Ketokivi, y Hameri, 2009) (Van Aken y Romme, 2004). La investigación científica según (Van Aken y Romme, 2004) desarrolla conocimiento de acuerdo con tres estrategias: Las ciencias formales con la creación de sistemas de proposiciones abstractas y poniendo a prueba su consistencia lógica, Las ciencias explicativas mediante la descripción, explicación o predicción de fenómenos observables (March y Smith, 1995) y Las ciencias de diseño por medio de la cual el conocimiento se produce a través de la creación e implementación de una solución capaz de manipular o alterar un fenómeno particular (Kasanen, Lukka, & Siitonen, 1993) (Vaishnavi y Kuechler, 2007).

1.2. La calidad de la investigación cualitativa

El hecho que un proceso de investigación cualitativa sea más dinámico y flexible que un proceso de investigación cuantitativa no desvirtúa la calidad con que esta se lleva a cabo (Noreña, Alcaraz Moreno, Rojas y Rebolledo Malpica, 2012). De acuerdo con Calderón, (2002) la evaluación de estudios cualitativos debe considerar la realidad y complejidad del fenómeno que se busca entender. Por lo tanto, las investigaciones cualitativas se evalúan de manera diferente a las del enfoque cuantitativo, debido a la forma de plantear los problemas de investigación y la manera de abordarlos. Los criterios de calidad para considerar el rigor de la investigación cualitativa:

- **Fiabilidad o consistencia:** Es la capacidad de replicar el estudio por otros investigadores al usar los mismos métodos y obtenga resultados similares. (Petty, Thomson y Stew, 2012) (Kirk y Miller, 1986)
- **Validez:** Es la interpretación correcta de los resultados y la manifestación del grado de fidelidad con que se muestra el fenómeno investigado. La validez refleja el cuidado exhaustivo del proceso metodológico, así la investigación se hace creíble.
- **Autenticidad:** Es la aproximación que los resultados de una investigación tienen con relación con el fenómeno observado. Se evitan conjeturas a priori sobre la realidad estudiada por parte del investigador. (Petty et al., 2012)
- **Transferibilidad:** O aplicabilidad, consiste en poder transferir los resultados de la investigación a otros contextos. (Bakås, Givaert, y Van Landeghem, 2011)
- **Dependencia:** Este criterio hace referencia a la estabilidad de los datos. En la investigación cualitativa, por su complejidad, la estabilidad de los datos no está asegurada, como tampoco es posible una réplica exacta de un estudio.
- **Neutralidad u objetividad:** Los resultados de la investigación deben garantizar la veracidad de las descripciones realizadas por los participantes.
- **Relevancia:** Evalúa el logro de los objetivos del proyecto y si se obtuvo un mejor conocimiento del fenómeno o hubo alguna repercusión positiva en el contexto estudiando. Este criterio se refiere a la contribución con nuevos hallazgos y a la configuración de nuevos planteamientos teóricos o conceptuales.
- **Concordancia teórico-epistemológica:** Está determinada por la consistencia entre el problema o tema que se va a investigar y la teoría empleada para la comprensión del fenómeno.

1.3. La investigación en ciencias del diseño

Algunos autores se refieren al DSR como Investigación Constructiva (IC) como lo describen en sus trabajos (Smith, 2015) y (Rocha, Formoso, Tzortzopoulos-Fazenda, Koskela y Tezel, 2012), sin embargo, hay sutiles diferencias entre estas dos formas de producción de conocimiento. En ambas estrategias se desarrollan artefactos para resolver problemas propios de algunas disciplinas donde el conocimiento se adquiere a partir de la experiencia en la práctica profesional. De acuerdo con el trabajo de (Piirainen & Gonzalez, 2013) la IC busca resolver un problema por medio de un artefacto y mide su éxito y validez en función de la

forma en que se percibió su utilidad para resolver el problema. De igual manera el DSR también desarrolla artefactos en diferentes entornos, especialmente cuando los artefactos se evalúan únicamente en función de su utilidad. La DSR se ha desarrollado a partir de su conceptualización por Simon (1996) como una forma de crear conocimiento, las primeras aplicaciones fueron realizadas para resolver problemas de investigación en Tecnologías de la Información (TI). De otra parte, la IC fue conceptualizada para la gestión contable por Kasanen et al. (1993) y más tarde por Lukka (2003) amplía la perspectiva a otras áreas donde la investigación científica no permite abordar las problemáticas de investigación según sus particularidades.

En términos generales el DSR y la IC son bastante similares, Piirainen y Gonzalez (2013) afirman que la IC es un subconjunto del DSR posicionando una de las principales diferencias entre el DSR y la IC, donde el DSR no requiere necesariamente la creación de un artefacto y la investigación en la IC requiere de la validación del artefacto. Ambas son utilizadas para abordar problemas similares y desarrollan artefactos, sin embargo, hay otra diferencia en cuanto a la evaluación de la utilidad de la solución y sobre la contribución al conocimiento de la DSR. El DSR considera el desempeño del artefacto con respecto de sus requisitos funcionales en lugar de la validación de los conceptos teóricos asociados con el artefacto como si lo hace la IC.

Ambos enfoques son pertinentes para investigación en áreas como Administración de empresas, Sistemas de información y Tecnología, Salud, Ingeniería y particularmente Gestión de la construcción (Kasanen et al., 1993); (Lukka, 2003); (Van Aken y Romme, 2004) (Hevner, March, Park y Ram, 2004) esto se logra al abordar y resolver problemas prácticos mediante la síntesis o construcción de artefactos basados en el conocimiento científico existente (Piirainen y Gonzalez, 2013). Esta construcción permite establecer fuertes relaciones entre la teoría y la práctica, lo que permite desarrollar el conocimiento a partir de los profesionales de la disciplina para diseñar soluciones a los problemas de campo, fortaleciendo así la relevancia de la investigación académica (Van Aken y Romme, 2004) Esto es lo que en investigación en temas de gestión se denomina el “dilema de la relevancia o el rigor” (Whyte, 1991). El dilema aparece cuando la "teoría está bien demostrada científicamente, pero entonces es demasiado reduccionista y por lo tanto demasiado amplia

o demasiado trivial para ser de mucha relevancia práctica, o pertinentes a la práctica, pero que carece de una justificación suficientemente rigurosa" (Van Aken y Romme, 2004).

El objetivo del DSR es "producir una construcción innovadora, destinada a resolver los problemas que enfrenta el mundo real y, por eso significa que, hacer una contribución a la teoría de la disciplina en la que se aplica" (Lukka, 2003). Dicho de otra manera, el DSR cuenta con la capacidad de acercar las actividades académicas de un campo profesional con su homólogo de la industria (Smith, 2015) haciendo pertinente este tipo de investigaciones en el campo académico con el objeto de construir conocimiento a partir de estas fuentes. El DSR ha demostrado ser una metodología con aplicación en el mundo real, capaz de sustentar la relevancia de los problemas que aborda.

La investigación en ciencias de diseño permite la creación de un “artefacto innovador intencional” de un dominio especial problema. Intencional, pues se desarrolla con propósito de contribuir a la solución de un problema específico de la disciplina. El artefacto una vez desarrollado, debe ser evaluado con el fin de asegurar su utilidad para resolver el problema especificado, o proporcionar una solución más eficaz que puede ser:

- Una construcción: un desarrollo de conceptos de un dominio específico para describir un problema y proponer sus posibles soluciones: una nueva teoría, un algoritmo, un software, una herramienta de evaluación, etc.
- Un método: que es un conjunto de pasos para la ejecución de una tarea,
- Un modelo o un marco: un grupo de elementos que expresan las relaciones entre los constructos, o
- Una instancia: Una aplicación de constructos, modelos y métodos para demostrar la viabilidad de los elementos conceptuales que la solución contiene. Esta instancia puede estar desarrollada en términos de la epistemológica, la teórica, el método y la técnica (Bellini, 2003).

Una característica destacada del DSR se refiere a la forma de validación del artefacto, la cual no tiene la exigencia de la investigación exploratoria basado en evidencia empírica. “Lo que sí es importante es que las conclusiones tienen que ser argumentadas de manera objetiva y definida. Esto puede implicar la evaluación de la "construcción" que está desarrollando

analíticamente vs algunos criterios predefinidos o realizar algunas pruebas de referencia con el prototipo” (Smith, 2015).

1.4. La construcción de artefactos

(March y Smith, 1995) afirman que el proceso de investigación se basa en la creación de “cosas” que sirven a los propósitos humanos y la evaluación de su desempeño en uso. La investigación en DSR implica la presencia de bucles de realimentación en cada uno de los ciclos que componen el proceso de investigación, como se detallara más adelante: Relevancia, Diseño y Rigor. La creación del conocimiento da lugar a la revisión detallada del problema, la cual conduce a un nuevo ciclo de diseño (Vaishnavi y Kuechler, 2007). En la fase de conclusión, al entender el impacto del problema, surge un nuevo ciclo de investigación dependiendo del alcance de este impacto. La etapa de construcción sin duda es la que implica la mayor cantidad de bucles, es un proceso iterativo e incremental (Hevner et al., 2004). La aplicación y el ensayo de una solución preceden a su completo desarrollo, y sólo a través de su estudio y utilización es posible formalizar los artefactos desarrollados (March y Smith, 1995).

El proceso de investigación así entendido, se lleva a cabo por medio de tres ciclos con actividades altamente relacionadas entre ellos:

1. **El ciclo relevancia:** Dá inicio a la DSR por medio de la contextualización de su aplicación. Se proporcionan los insumos de la investigación a manera de requisitos, las restricciones para su diseño y se definen los criterios de aceptación de la evaluación de los resultados de la investigación.
2. **El ciclo de diseño:** Corresponde a las actividades y procesos centrales de la investigación. En este ciclo se desarrolla la construcción y evaluación de los artefactos de diseño (Hevner, 2007). La proposición de hipótesis sobre el comportamiento esperado que conduce a “cuestionar, buscar explicaciones, y en última instancia a una modificación de la solución” (Manson, 2006).
3. **El ciclo rigor:** En este ciclo se proporciona el conocimiento que permite asegurar la innovación por medio de las soluciones factibles accediendo a las teorías que sustentan el conocimiento (Gregor y Jones, 2007). Aquí los investigadores están obligados a hacer referencia a la base del conocimiento, para garantizar que los artefactos producidos son

contribuciones no rutinarias con fundamento en la aplicación de procedimientos de investigación reconocidos.

Los artefactos obtenidos en DSR se perciben a partir del conocimiento que contienen, y deben ser útiles para abordar la solución a problemas relevantes para la organización (March y Storey, 2008) (Gill y Hevner, 2013). Además de los artefactos de diseño mencionados anteriormente, se reconocen otras construcciones como artefactos: las innovaciones sociales, nuevas o previamente desconocidas propiedades de los recursos técnicos, sociales o de información (March y Storey, 2008), nuevas teorías explicativas, nuevos modelos de diseño y desarrollos e implementación procesos o métodos (Ellis y Levy, 2010). Para orientar la investigación en DSR, (Hevner et al., 2004) han presentado un conjunto de directrices tomadas con base las TI. Entonces, la investigación en DSR debe ser capaz de:

1. **Diseñar un artefacto:** Producir un artefacto viable en la forma de una construcción, un modelo, un método o una creación de instancias,
2. **Demostrar la relevancia del problema:** Desarrollar soluciones basadas en la tecnología para problemas relevantes de la disciplina,
3. **Evaluar el diseño:** Demostrar la utilidad, la calidad y la eficacia del diseño rigurosamente a través de métodos de evaluación que le sean pertinentes,
4. **Proporcionar contribuciones de investigación:** Proporcionar contribuciones claras y verificables en forma de un artefacto o de la construir de la base del conocimiento,
5. **Garantizar el rigor de la investigación:** Aplicar una metodología rigurosa para la construcción y evaluación del artefacto,
6. **Desarrollar el diseño como un proceso de búsqueda:** Propiciar los medios para alcanzar los objetivos bajo las restricciones del entorno del problema, y
7. **Comunicar los resultados de la investigación:** Presentar de manera efectiva los resultados a la tecnología y al público orientado a la gestión.

La utilidad del artefacto, demostrada a partir de la evaluación, debe garantizar su sostenibilidad en el tiempo (Gill y Hevner, 2013) para lo cual se dispone de un set de prácticas: observación, análisis, experimentación, prueba y descripción (Hevner et al., 2004). Es importante resaltar que el uso de estas prácticas no es proceso estrictamente lineal, ya que la evaluación en si misma tiene la capacidad de identificar situaciones no estudiadas

anteriormente que conducen a producir nuevos conocimientos. (Vaishnavi y Kuechler, 2007) y (Peffer, Tuunanen, Rothenberger, y Chatterjee, 2008) sostienen también que, el diseño y la evaluación pueden llegar a revelar un problema totalmente diferente que hay que resolver, en ambos casos, estos conocimientos se integran a un nuevo ciclo de diseño dando lugar a cambios que a su vez requieren nuevas evaluaciones.

Una solución es completa y eficaz cuando satisface los requisitos y restricciones del problema que estaba destinado a resolver. Por medio del DSR se desarrollan e implementan soluciones innovadoras para abordar problemáticas de gestión en la construcción (AlSehaimi et al., 2013). Es una manera de creación de conocimiento desde la práctica profesional para fortalecer la importancia académica en la gestión de construcción de acuerdo con Koskela, (2008). En este sentido, tanto la construcción, como la evaluación, del artefacto se deben realizar con rigor, y los resultados de la investigación deben ser presentados de manera efectiva a los usuarios de la solución. (Hevner et al., 2004) ofrecieron una novedosa mirada al DSR dándole la importancia como una metodología que permite mejorar las condiciones asociadas al rigor y la relevancia.

1.5. El modelo de evolución como un artefacto

Un modelo de evolución de madurez requiere de una herramienta para evaluar la madurez con la cual establecer un punto de partida hacia un estado superior de madurez. Wendler, (2012) sostiene que para el desarrollo de nuevos modelos de madurez no es suficiente su existencia en términos de contenido y estructura, se requiere probar su utilidad para ser aplicados y conocer sus beneficios en el contexto para el cual se diseñó.

El modelo de evolución en sí, es un artefacto, por lo que la aplicabilidad del paradigma del DSR es completamente pertinente. Para el desarrollo de nuevos modelos de madurez se resalta un modelo de proceso presentado por (Becker, Knackstedt y Pöppelbuß, 2009) el cual contiene ocho fases siguiendo las directrices de (Hevner et al., 2004) y recomienda que el modelo debe ser evaluado para demostrar su idoneidad por medio de métodos que demuestren la rigurosidad de la investigación. Este es el punto diferenciador entre artefactos diseñados con el propósito de contribuir a resolver la cuestión y aquellos orientados al desarrollo de modelos conceptuales.

1.6. Puntos clave de la sección

La investigación se desarrolla de acuerdo con el enfoque cualitativo enmarcado en el Design Science Research (DSR) integrando métodos y procedimientos cuidadosamente seleccionados para el estudio, la recopilación, organización y análisis de datos, y la definición de procedimientos que permiten la síntesis. Se requiere de la utilización de métodos cuantitativos para soportar los resultados, esto configura una metodología mixta la cual se despliega a lo largo de la investigación.

Se garantiza el cumplimiento a los criterios de calidad y rigor de la investigación cualitativa presentada anteriormente: Fiabilidad, Validez, Autenticidad, Transferibilidad, Dependencia, Neutralidad, Relevancia, Concordancia teórico-epistemológica.

A continuación, se describen la Metodología de Investigación y los métodos seleccionados para esta investigación.

2. Métodos de investigación seleccionados

Los métodos de investigación ayudan a obtener de manera progresiva la información que requiere. Se seleccionaron, la Revisión de literatura, la Entrevista individual y la Encuesta. La información base para el estudio se obtuvo de tres fuentes: Consulta a Bases de datos. Entrevistas y Encuestas a expertos. Para las entrevistas se obtuvo un registro en audio autorizado por el entrevistado, el cual está identificado en un archivo digital y cuenta con la transcripción. La encuesta se realiza con la aplicación Google Forms.

2.1 Revisión de la literatura

La revisión de la literatura es una actividad permanente durante el desarrollo de la tesis, haciendo uso de “Alertas” en las Bases de Datos para monitorear la publicación de artículos con las temáticas relacionadas con la investigación. Como una de las primeras actividades en la revisión de literatura, se identifican las diferentes temáticas, y los problemas actuales en que están interesados los investigadores. De esta manera se enmarca el interés de la presente investigación y se identifica una de las brechas del conocimiento que hacen de esta, una investigación relevante para la disciplina (Meredith, 1993). La revisión de la literatura se adelantó mediante un estudio de mapeo sistemático de referencias bibliográficas siguiendo la metodología de (Wendler, 2012) y (Becker et al., 2009). Aspectos de éste estudio se presentan en el Capítulo 2 y sus resultados fueron publicados en la revista Espacios, Vol. 38 (No 39) Año 2017. Pág. 30, revista categoría Q3 del JCR (Cano et al., 2017b). En este artículo se desarrolla el método de búsqueda, se realiza el análisis de la literatura para la investigación, se identifican la brecha y se presentan otros temas de interés para investigaciones futuras.

2.2 La entrevista individual

Se llevan a cabo tres etapas de entrevistas semi-estructuradas con investigadores, académicos, consultores y practicantes directamente relacionados con implementación y gestión de LC. Cada una de las entrevistas fue diseñada con preguntas abiertas que dan lugar a que el entrevistado exprese su percepción acerca de la cuestión específica, y sobre temas relacionados, que el mismo entrevistado conecta como importantes sobre el tópico en investigación (Britten, 1995). En estas entrevistas, de acuerdo con (Kvale, 2007) es importante considerar la reacción e interacción del investigador, lo que permite ampliar el

entendimiento y precisión respecto de las respuestas del entrevistado, además que el investigador puede consultar, en el mismo sentido de la respuesta, elementos complementarios de su interés que permitan profundizar en el tema principalmente en la experiencia personal del entrevistado (Easterby-Smith, M., Thorpe, & Lowe, 1991) (Shehu & Akintoye, 2010). De acuerdo con (Kvale, 2007) y (Nesensohn, 2014) el número de entrevistas a realizar en el estudio varía entre cinco y 25, en razón al tipo de estudio cualitativo. El rango de entrevistas recomendado tiene que ver con restricciones de tiempo y recursos tanto del entrevistado como del investigador.

Las etapas de realización de las entrevistas

Estas entrevistas se llevan a cabo en tres momentos de la investigación y permiten identificar progresivamente información relevante:

- **Etapa I:** Entrevista exploratoria inicial,
- **Etapa II:** Entrevista para precisar categorías y factores de madurez,
- **Etapa III:** Entrevista principal para identificación de elementos de madurez.

Pruebas piloto y desarrollo de las entrevistas

Por cada formulario de entrevista, y para la encuesta, primero se aplicó una prueba piloto a cinco expertos en Colombia para establecer la precisión de su contenido. Esta prueba piloto permitió corregir el formulario de preguntas conforme con el objeto de estudio (Remenyi, Williams, Money, & Swartz, 1998).

Luego de contar con el formulario de preguntas, las entrevistas se condujeron personalmente en los lugares de trabajo de cada uno de los entrevistados. No obstante, se requirió realizar tres entrevistas de la etapa I y dos de la etapa III de manera virtual en razón a la ubicación del entrevistado. A todos los entrevistados se les consultó, antes de iniciar la entrevista, sobre su aceptación para participar de la investigación, así como su autorización para permitir la grabación en audio de la sesión. En ningún caso se dio a conocer por adelantado el formulario de preguntas, esto con la intención de recibir la información del experto sin estar influenciada por las preguntas.

Análisis de las entrevistas

El análisis de las entrevistas se realiza siguiendo la recomendación de método desarrollado en el trabajo de (Nesensohn, 2014) El Método Framework©. El método fue desarrollado por (Ritchie & Spencer, 1994) y su uso se concentra en la organización y gestión de la investigación a través del compendio de la información. Resulta una matriz robusta y flexible la cual permite al investigador analizar los datos por caso y por tema. El Método Framework© es un método de análisis temático o análisis de contenido cualitativo. Ayuda a identificar aspectos comunes, y diferencias, en los datos cualitativos antes de centrarse en las relaciones entre las diferentes partes de los datos. Con la ayuda de este método se pretende obtener conclusiones descriptivas y/o explicativas respecto del o los temas de interés.

El Método Framework© es más comúnmente utilizado para el análisis temático de transcripciones de entrevistas semi-estructuradas. El desarrollo de los temas es una característica común de análisis de datos cualitativos, que implica la búsqueda sistemática de patrones para generar descripciones completas capaces de arrojar luz sobre el fenómeno que se investiga. El método no tiene la capacidad de análisis de datos altamente heterogéneos, por lo que es recomendado para estudiar temas clave, así los entrevistados tengan diferentes puntos de vista o experiencias en relación con cada tema, ayuda a establecer relaciones entre ellos, encontrar diferencias o semejanzas notables en esta comparación. El procedimiento de análisis para el Método Framework© considera que:

- Idealmente se requiere una buena calidad de transcripción del audio de la entrevista,
- El investigador debe familiarizarse con toda la entrevista mediante la grabación de audio y/o transcripción y las notas contextuales que fueron registrados,
- Se codifican los objetivos para clasificar todos los datos de modo que pueda ser comparado sistemáticamente con otras partes del conjunto de datos,
- Se desarrolla un marco analítico de trabajo mediante la comparación de las etiquetas que hayan sido definidas y aplicadas a las transcripciones,
- Se aplica el marco analítico de trabajo aplica mediante la indexación de las transcripciones utilizando las categorías y los códigos existentes,
- Se realiza la cartografía que resume los datos por categoría de cada transcripción,

- Finalmente, en la interpretación de los datos, se identifican las características y las diferencias entre los datos para explorar relaciones y/o causalidad.

2.3 La encuesta

Es la actividad que permite, con ayuda de expertos, identificar la importancia de los elementos de interés del investigador. Con ella el investigador obtiene una valoración subjetiva de los expertos respecto de los elementos de interés que han resultado de la revisión de la literatura y la entrevista principal. Esta información es objeto de un análisis cuantitativo de la información obtenida para más adelante desarrollar la modelización de las relaciones entre los elementos con el uso de Modelos de Ecuaciones Estructurales, Structural Equations Model (SEM). El SEM es una técnica estadística multivariada que permite probar y estimar relaciones causales a partir de datos estadísticos y suposiciones cualitativas sobre la causalidad que más adelante se confirma.

Esta encuesta cuenta 64 preguntas con solicitud de respuestas obligatorias para garantizar que no haya datos faltantes. La Encuesta fue desarrollada en la aplicación de Google, Google Formularios, con lo cual cada respuesta se recibe automáticamente y la aplicación entrega la información tabulada para ser analizada posteriormente. El formulario de preguntas de la encuesta fue escrito en tres idiomas: español, inglés y portugués.

2.4 Muestreo

Con el diseño de las muestras se busca identificar la cantidad de participantes. Con la definición de criterios obligatorios y complementarios se seleccionaron estos participantes para garantizar que cuentan con el conocimiento y experiencia en LC. En la Tabla A1.1 se presenta la información de las muestras previstas y la cantidad de información obtenida para cada actividad de recolección de información.

Tabla A1.1. Selección de la muestra para cada una de las actividades de recolección de información.

Actividad de recolección de información	Criterios para la selección de participantes	Características	Tamaño de la muestra	Obtenidos
Entrevista exploratoria inicial	Obligatorio	-Uno o más años de experiencia en implementación y/o desarrollo en LC, y/o -Responsable de LC en la organización	18 Empresas Constructoras (Profesionales en empresas constructoras Colombianas)	30 Profesionales en Empresas Constructoras Colombianas

		-Uno o más años de experiencia en la industria de la construcción, o -Investigador o Profesor Universitario con experiencia en LC		
	Complementario (Opcional)	-Experiencia en alta dirección relacionada con LC, y/o -Experiencia en investigación en LC		
Entrevista exploratoria referida a la identificación de categorías de madurez	Obligatorio	-Cinco o más años de experiencia en implementación y/o desarrollo en LC, y/o -Responsable de LC en la organización -Cinco o más años de experiencia en la industria de la construcción, y/o -Investigador o Profesor Universitario con experiencia en LC	Entre 5 y 25 profesionales con experiencia en investigación y/o implementación y desarrollo de LC en Colombia y Chile	10 expertos en investigación y/o implementación y desarrollo de LC 2 en Colombia y 8 en Chile
	Complementario (Opcional)	-Experiencia en alta dirección relacionada con LC, y/o -Experiencia en investigación en LC		
Entrevista principal para la identificación de los elementos de madurez	Obligatorio	-Cinco o más años de experiencia en implementación y/o desarrollo en LC, y/o -Responsable de LC en la organización, y/o -Cinco o más años de experiencia en la industria de la construcción, y/o -Investigador o Profesor Universitario con experiencia en LC	Entre 5 y 25 profesionales con experiencia en LC, sin embargo, se precisa al menos 12 profesionales con experiencia en investigación y/o implementación y desarrollo de LC, así:	29 expertos en investigación y/o implementación y desarrollo de LC: -3 en Colombia -12 en Chile -10 en Brasil -4 en Perú
	Complementario (Opcional)	-Experiencia en alta dirección relacionada con LC, y/o -Experiencia en investigación en LC		
Encuesta	Obligatorio	-Tres o más años de experiencia en implementación y/o desarrollo en LC, y/o -Responsable de LC en la organización, y/o -Tres o más años de experiencia en la industria de la construcción	90 profesionales con experiencia en investigación y/o implementación y desarrollo de LC alrededor del mundo en países según investigaciones publicadas en revistas de alto impacto.	111 profesionales con experiencia en investigación y/o implementación y desarrollo de LC en cuatro continentes y 19 países.
	Complementario (Opcional)	-Experiencia en alta dirección relacionada con LC, y/o -Experiencia en investigación en LC		

2.5 Recolección y tratamiento de la información

2.5.1 Etapa I. Entrevista exploratoria inicial

Se llevó a cabo con 30 participantes de empresas constructoras colombianas que vienen desarrollando procesos de implementación LC. El objetivo de esta entrevista fue el de identificar, por medio de la experiencia y conocimiento del entrevistado, aspectos relevantes sobre seis temas de interés, desarrollados en 26 preguntas, que condujeran a precisar el alcance de la investigación. Anexo A1.1A.

- a) El modelo de gestión desarrollado en la organización para identificar con qué modelo se lleva a cabo la gestión en la organización,
- b) La identificación del entorno de producción en que se desarrolla la actividad de producción para identificar las categorías en las cuales se clasifican los diferentes tipos de proyectos de construcción de acuerdo con la teoría relacionada en manufactura,
- c) La identificación del sistema de producción para precisar con ayuda de sus características, el tipo de sistema que es la producción en construcción de acuerdo con la teoría relacionada en manufactura,
- d) Conocer el proceso de implementación de LC para identificar las Barreras que se oponen a esta implementación, así como los factores, que los practicantes consideran como responsables del éxito de la implementación, o los Factores Críticos de Éxito (FCE) y las referencias bibliográficas. Se prevé que su identificación permite agruparlos en categorías que podrían ser las categorías del modelo de madurez.
- e) Explorar el entendimiento del concepto de valor por parte de la organización, por medio de los entrevistados, para considerar este entendimiento, la teoría y referencias bibliográficas sobre valor para considerarlo en la construcción del modelo de evolución.
- f) Explorar en los entrevistados, el entendimiento de la madurez en términos de LC, y las características que permitan aproximar esta investigación a la identificación de los factores y elementos de madurez.

Desarrollo del tamaño de la muestra

Se desarrolló una muestra representativa por medio de un cálculo basado en una distribución normal, teniendo en cuenta la población total de constructoras colombianas, 765 para el año

2015. Para el desarrollo del tamaño de la muestra se tomaron en cuenta los valores recomendados por la literatura en cuanto al nivel de confianza, proporción esperada y el tamaño de la población obtenido, para la precisión esperada que es otra de las variables importantes dentro de este cálculo. Se decidió tomar un 10% de precisión de la muestra con el fin de adecuarla a las limitaciones encontradas a la hora de realizar el trabajo de campo dado que la industria de construcción colombiana cuenta con un nivel bajo de documentación LC. Para calcular la muestra representativa de acuerdo a la población total, se utilizó la ecuación general basada en una distribución normal. Esta se explica a continuación:

$$g) \quad n = (N * Z_{\alpha}^2 * p (1 - p)) / (d^2 * (N - 1) + Z_{\alpha}^2 * p (1 - p))$$

h) Donde:

i) N: Población: 756 empresas

j) Z_{α} : Valor de Z para el nivel de confianza: 1,96 (95%)

k) p : proporción esperada: 5%

l) d : Precisión: 10%

m) n : Tamaño de la muestra: 18 Empresas

Recolección de información

Estas entrevistas se realizan entre los meses de agosto de 2014 y marzo de 2015 a 35 profesionales responsables de LC en igual número de empresas donde la mayoría fueron parte de un proyecto inicial de difusión de LC en Colombia en el año 2000 (Páez et al., 2013)

Las empresas que se encuentran adelantando procesos de implementación de LC se encuentran en diferentes rangos de antigüedad, lo que muestra que la edad de la empresa no es una barrera para integrar LC. En las Figuras A1.1 y A1.2 se muestra que los procesos de implementación de LC vienen realizándose desde hace 15 años. La mayor cantidad de empresas que están implementado LC lo hacen con menos de 5 años. En este estudio se concluyó que estas empresas hacen uso de entre 2 y cinco herramientas LC, siendo el Last Planner System (LPS) la herramienta más utilizada. En general las empresas tienen la percepción de ser empresas Lean con el solo hecho de implementar el LPS lo cual no es del todo correcto, pues ser Lean es más que la aplicación de una herramienta.

Figura A1.1: Antigüedad de la empresa constructora

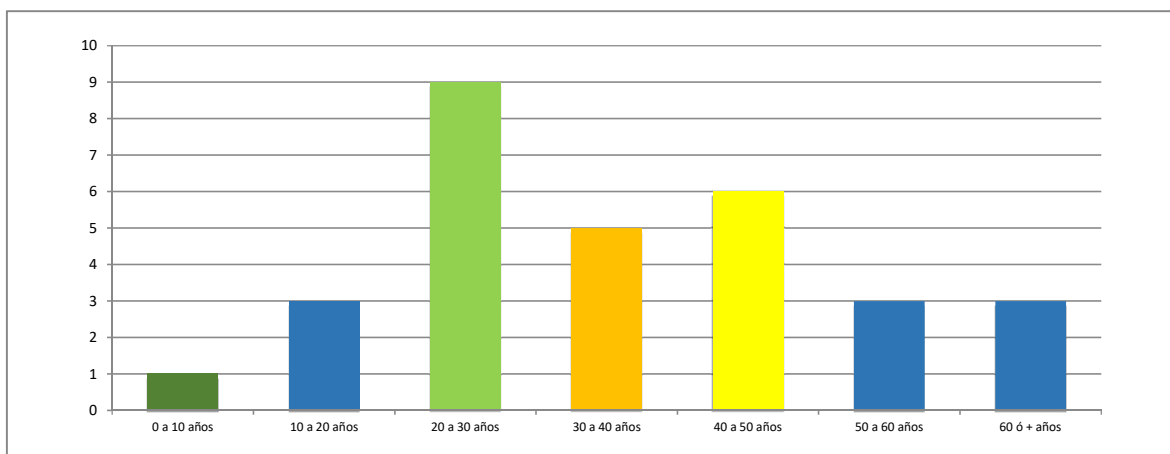
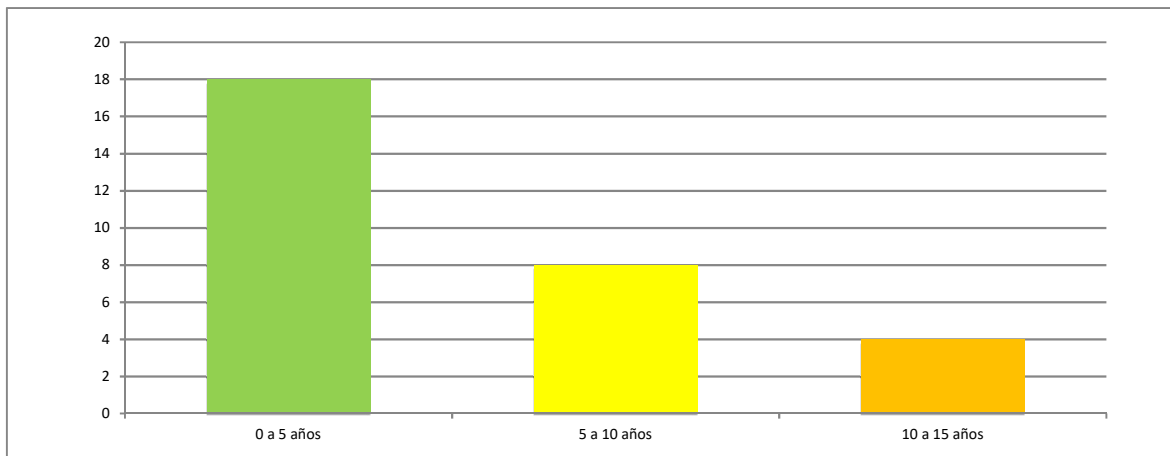


Figura A1.2: Tiempo de implementación de LC



Las actividades de implementación y desarrollo de LC están a cargo de profesionales que dirigen otros procesos, en un solo caso se dispone de un Coordinador Lean, sin que este coordinador cuente con un amplio margen de acción, sus tareas se limitan a coordinar las reuniones LPS y a recoger y publicar la información requerida por el LPS, Figura A1.3.

La mayoría de los profesionales responsables de LC son Ingenieros Civiles, el 46, 67%. En la Figura A1.4 se aprecia la participación de Arquitectos e Ingenieros de otras áreas, principalmente Ingenieros Industriales que vienen de la industria manufacturera donde adquirieron conocimientos en Lean Manufacturing.

Figura A1.3: Cargo de los profesionales responsables de LC

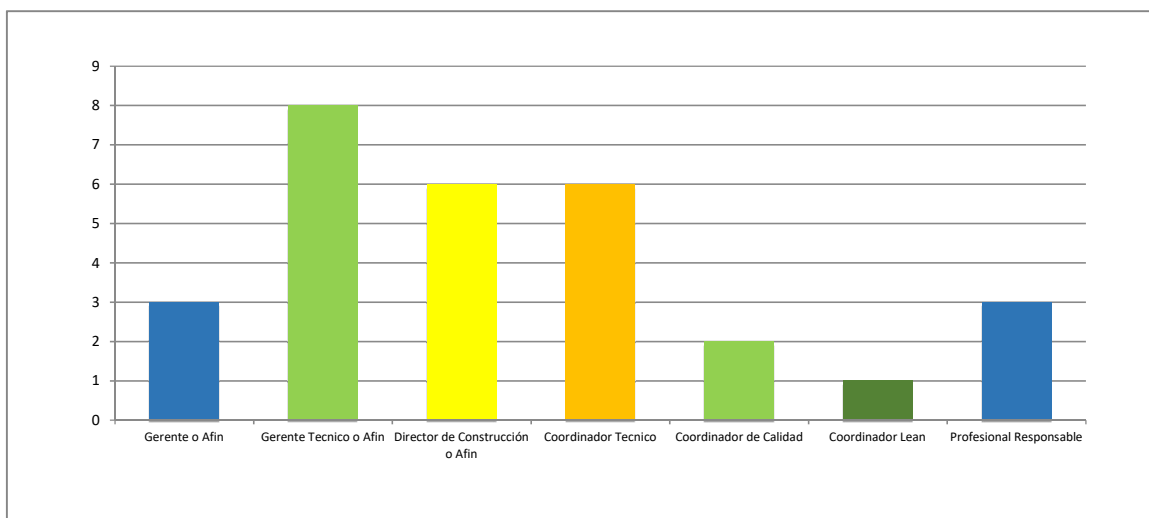
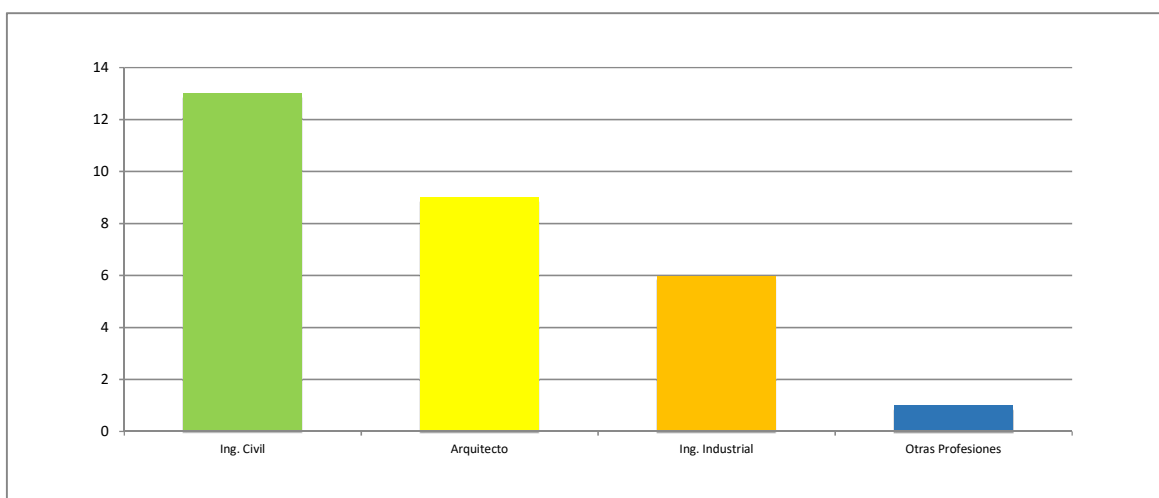


Figura A1.4: Profesionales responsables de LC



Respecto de los responsables de LC, el 96,67% son profesionales con experiencia en construcción mayor a 5 años como se aprecia en la Figura 1.5. El 46,67% cuenta con poca antigüedad en la empresa, lo que se puede entender como un indicio relacionado con la frecuente rotación de personal profesional en los proyectos, Figura A1.6. En esta misma lógica, el 63,33% de los profesionales responsables de LC cuentan con menos de 10 años de antigüedad en la empresa, siendo los profesionales con más de 25 años de experiencia en la empresa quienes constituyen la Alta Dirección.

Figura A1.5: Experiencia general de los profesionales responsables de LC

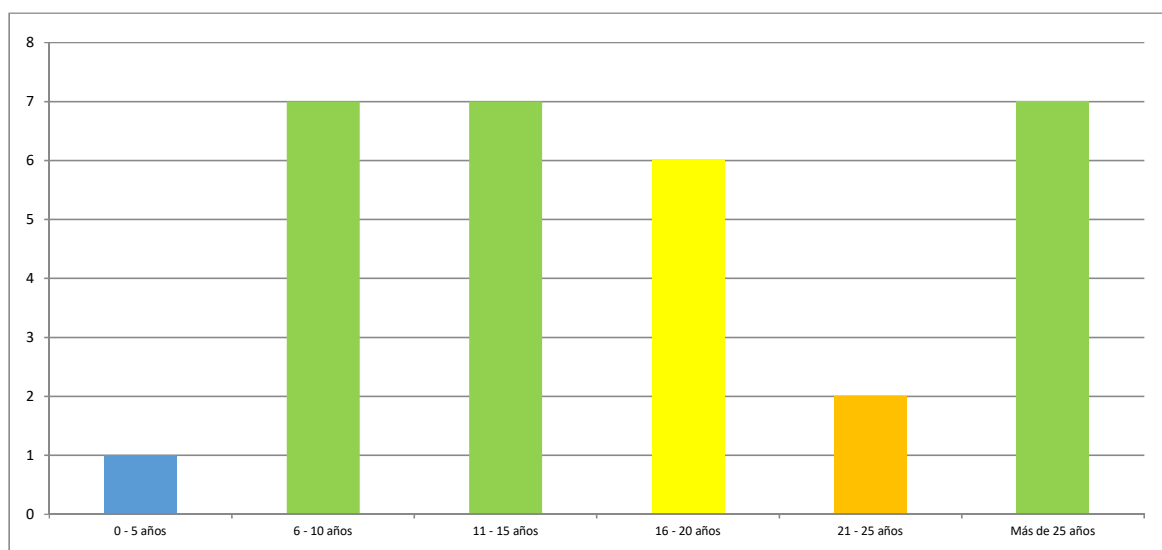
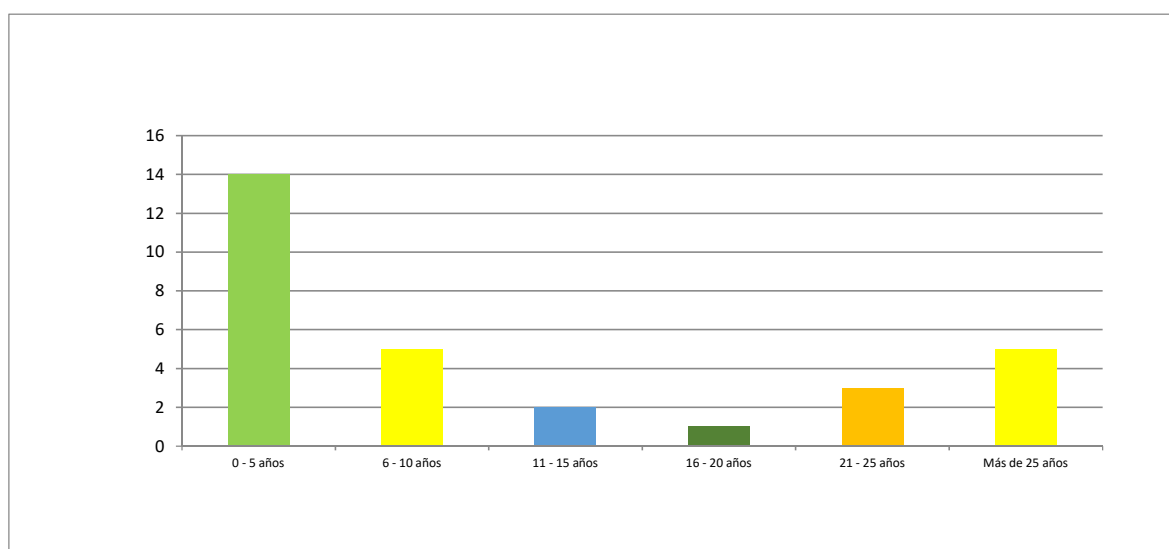
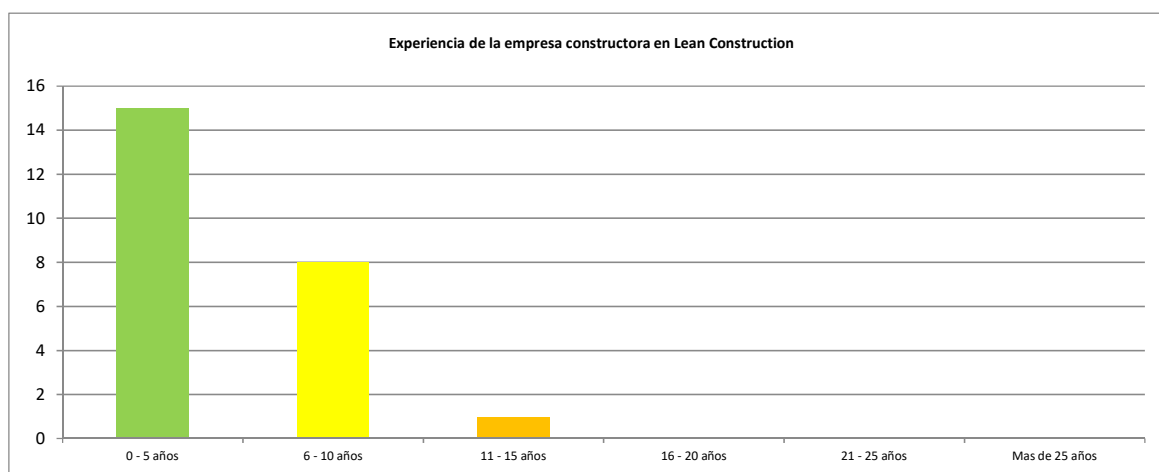


Figura A1.6: Antigüedad de los profesionales LC en la organización



El 62,5% de estos profesionales cuentan con experiencia en LC menor o igual a cinco años. El 95,8% del total de profesionales responsables de LC no supera los 10 años de experiencia, siendo esto consistente con el tiempo reportado de implementación LC en el país, que muestra un pequeño grupo de profesionales con experiencia LC entre 11 y 15 años correspondientes al 4,2%. Las empresas relacionadas en este estudio, y que recibieron capacitación en LC en los inicios de difusión de la LC en Colombia, solo se mantiene un 4,2 % de profesionales que cuentan con experiencia en este rango. Figura A1.7.

Figura A1.7: Experiencia de la empresa constructora en LC



2.5.2 Etapa II. Entrevista exploratoria para precisar categorías y factores de madurez

Esta entrevista fue realizada a dos investigadores en Colombia y ocho investigadores y expertos en Chile, en el marco de la realización de la primera pasantía de investigación en la Universidad Católica de Chile en el Centro de Excelencia en Gestión de la Producción, GEPUC. El objetivo fue precisar las categorías en que se agrupan, para esta investigación, los factores de madurez de acuerdo con los resultados de la primera etapa de entrevistas y la revisión de la literatura.

Desarrollo del tamaño de la muestra

En el desarrollo de la investigación cualitativa, (Nesensohn, 2014) se refiere a (Kvale, 2007) quien sugiere que debido al tiempo y los recursos disponibles para aplicar este método, se acepta que se realicen entre cinco y 25 entrevistas. Es así que en este rango se enmarco la consecución de la información para esta etapa según esta recomendación.

Recolección de información

El 80% de los participantes son Ingenieros Civiles, confirmando que son estos profesionales líderes de procesos de implementación y desarrollo de LC en las organizaciones, Figura A1.8. De estos participantes el 40% corresponde a profesores universitarios, que realizan también actividades de investigación en temáticas LC e investigación en LC, un 30% a consultores, un 20% a profesionales practicantes y un 10% un miembro de la alta dirección de una de las organizaciones consultadas, Figura A1.9.

Figura A1.8: Profesionales participantes Etapa II

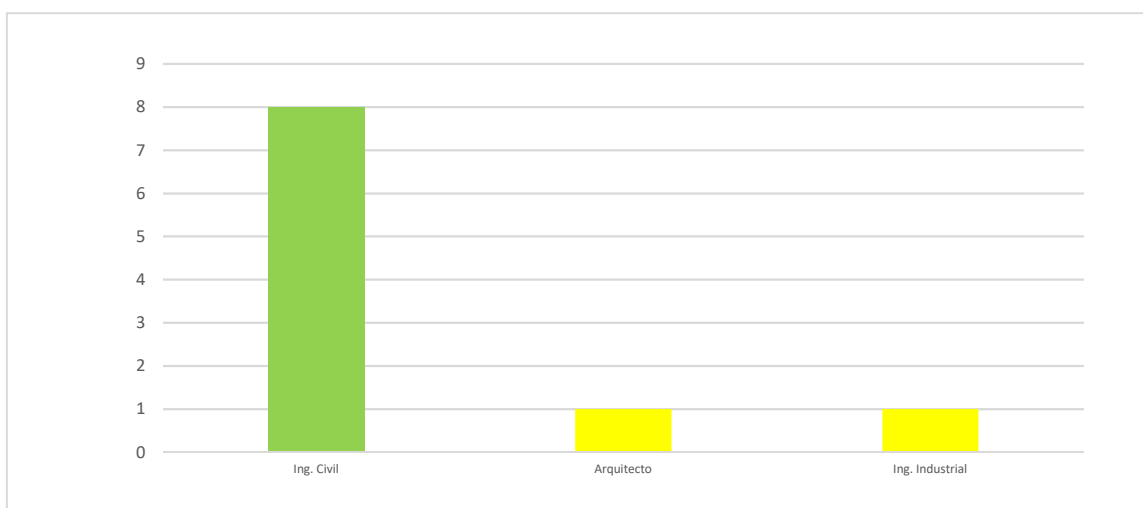
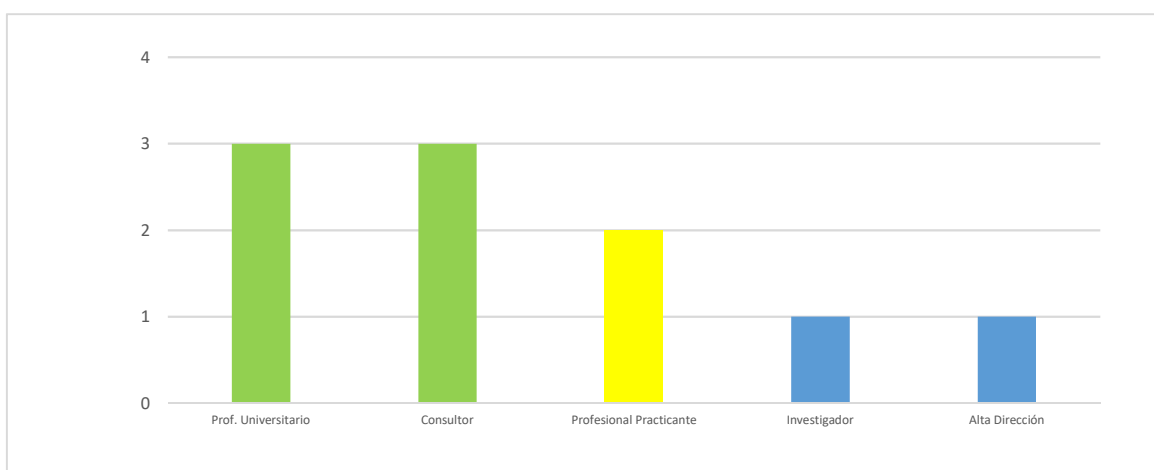


Figura A1.9: Ocupación de los participantes Etapa II



El 70% de los participantes cuentan con una experiencia general en construcción de más de 25 años de tal manera que el total de los participantes están por encima de los 6 años de experiencia, Figura A1.10. El 80% de ellos con experiencia en LC entre 6 y 15 años, consistente también con el tiempo en que se viene desarrollando LC en estos países. Un profesor investigador con experiencia entre 16 y 20 años en Colombia y un profesor investigador con experiencia de más de 25 años en Chile, Figura A1.11.

Figura A1.10: Experiencia general de participantes entrevistas Etapa II

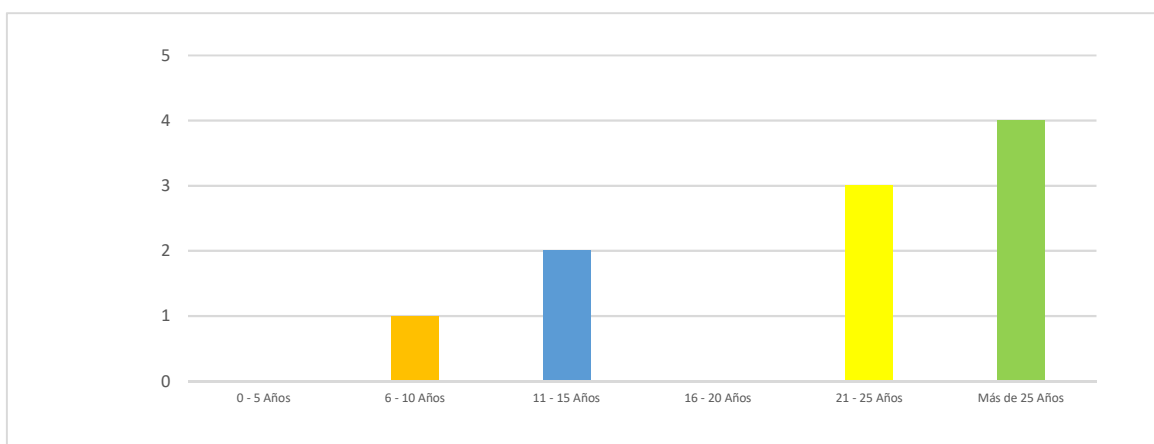
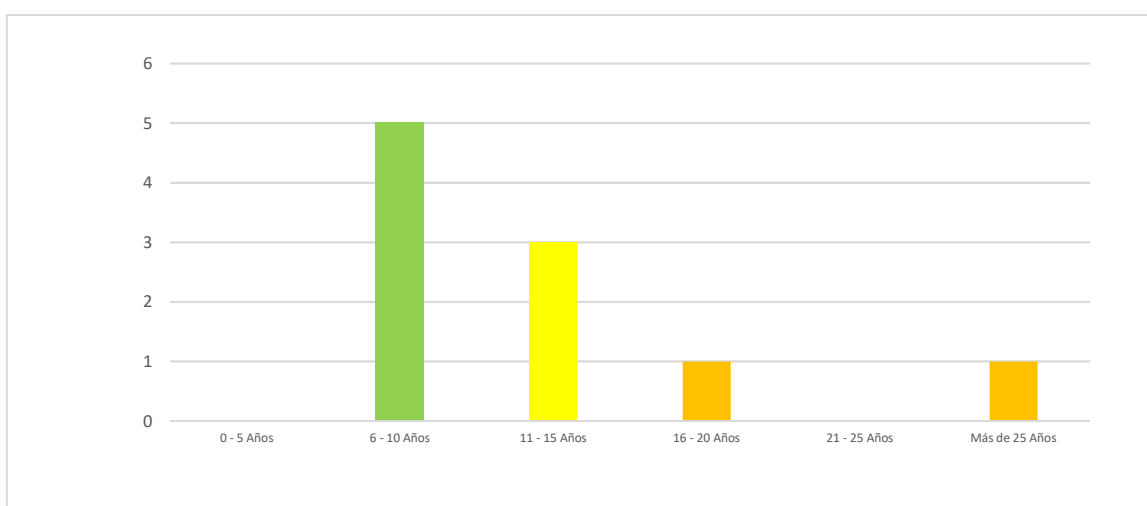


Figura A1.11: Experiencia en LC participantes entrevistas Etapa II



2.5.3 Etapa III. Entrevista principal para la identificación de los elementos de madurez

Con la entrevista principal se exploran aspectos que permiten identificar las características que evidencian la madurez de LC en la GPC, así como elementos asociados con la madurez. Se contó con la participación de 29 profesionales y expertos con experiencia en LC: 3 en Colombia, 12 en Chile, 10 en Brasil y 4 en Perú. Esta entrevista explora la madurez de LC con referencia elementos asociados con la madurez en las tres categorías propuestas con base en las referencias bibliográficas y entrevistas anteriores: Personas, Sistema de Producción y Soporte de la Organización al Proceso de Producción.

Con los resultados de estas entrevistas y las referencias bibliográficas, se identificaron 425 elementos asociados con la madurez, los cuales más adelante se agrupan en tres categorías. Estos elementos son objeto de análisis en el Capítulo 4.

Desarrollo del tamaño de la muestra

De igual manera como en el punto anterior, se sigue la recomendación de Nesensohn de seguir a (Kvale, 2007) y realizar entre cinco y 25 entrevistas. Sin embargo, teniendo en cuenta que se visitarían cuatro países de Suramérica, Chile, Brasil, Perú y Colombia, para la recolección de información, y que los profesionales con experiencia serían contactados por medio de los grupos de investigación que alojarían a la investigadora, se previó aplicar mínimo tres entrevistas en cada país para obtener una muestra mínima de 12 entrevistas.

Recolección de información

En una segunda, tercera y cuarta pasantías de investigación se realizaron las entrevistas de la Etapa III. El 90% de los participantes son Ingenieros Civiles, 52% de los participantes son profesionales practicantes incluido un miembro de la alta dirección de una importante constructora, un 31% profesores universitarios e investigadores en LC y un 17% consultores, Figuras A1.12 y A1.13.

Figura A1.12: Profesionales participantes Etapa III

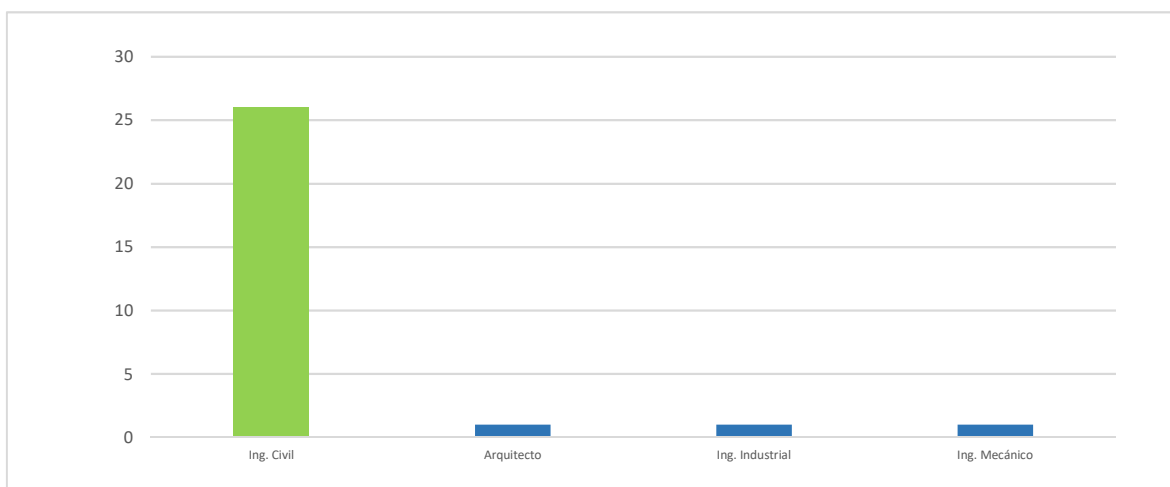
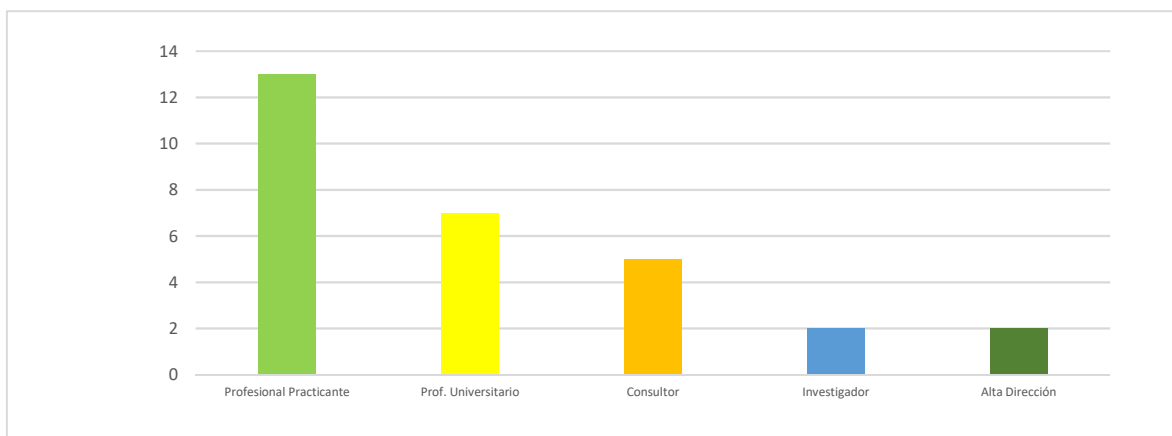


Figura A1.13: Ocupación de los participantes Etapa III



El 24% de los participantes cuentan con una experiencia general en construcción de más de 25 años de tal manera que el total de los participantes están por encima de los 6 años de experiencia, Figura A1.14. El 79% de los participantes cuentan con experiencia en LC entre 6 y 15 años, consistente también con el tiempo en que se viene desarrollando LC en estos países. Un profesor investigador con experiencia entre 16 y 20 años en Colombia, un profesor investigador entre 20 y 25 años en Brasil y dos profesores investigadores en Brasil y un profesional practicante con experiencia de más de 25 años en Chile, Figura A1.15.

Figura A1.14: Experiencia general participantes Etapa III

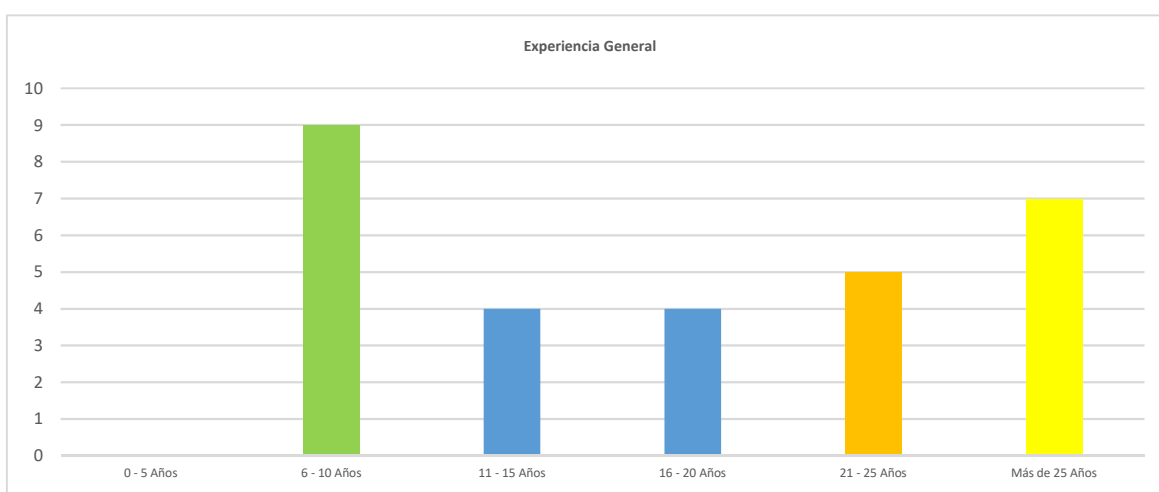
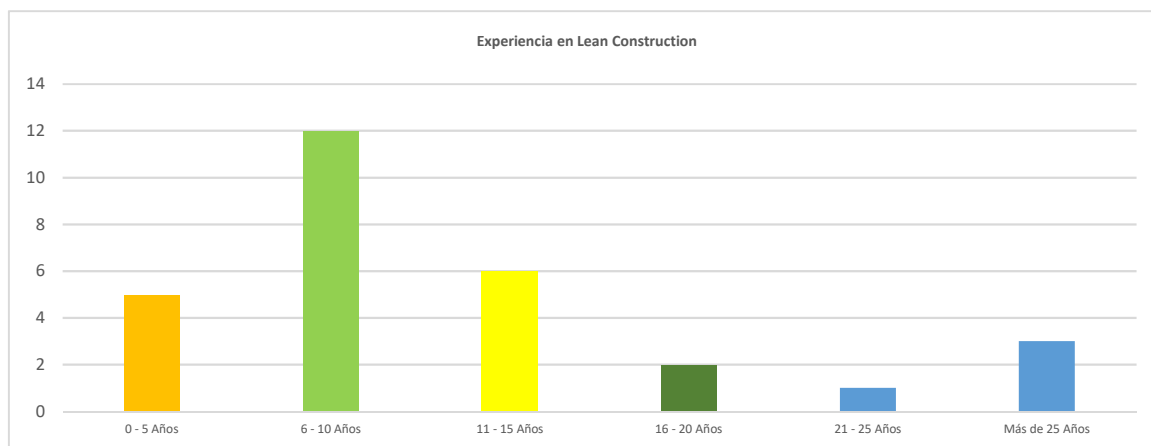


Figura A1.15: Experiencia en LC participantes Etapa III



En términos generales se puede verificar con la información presentada de las personas que participaron de estas etapas de consultas, que cuentan con la idoneidad para que sus respuestas de manera individual y colectiva puedan ser consideradas válidas para el estudio.

Encuesta

Los elementos identificados con las entrevistas previas y la revisión de bibliografía fueron clasificados en tres categorías y 55 grupos que más adelante en la investigación se denominan atributos de madurez. Se buscaba tener la certeza que los atributos que agrupan estos 425 elementos de madurez en el estudio correspondieran a conceptos asociados con la madurez de LC, por lo cual se realizó una consulta a 8 expertos, cuatro en Colombia y cuatro en Chile. Con cuyas respuestas se seleccionaron 48 de los 55 atributos para conformar más adelante el grupo de atributos a ser investigados en la encuesta. Ver Anexo A4.1.

Los participantes fueron seleccionados de acuerdo con su trayectoria en investigación, implementación y desarrollo de LC. Se invitó a cada una de las personas que fueron entrevistadas en las etapas previas, a académicos, investigadores y practicantes LC en 19 países. En general los participantes fueron seleccionados teniendo en cuenta publicaciones en revistas de alto impacto que fueron estudiadas en la revisión de literatura a lo largo de esta investigación. También fue de mucha ayuda para identificar profesionales con amplia trayectoria en investigación, implementación y práctica LC la red profesional LinkedIn (www.linkedin.com) en ella se identificaron los perfiles de destacados profesionales LC y por medio de ellos algunos de sus colegas que han sido coautores en investigaciones en LC. De

igual manera con los artículos publicados en las memorias de los congresos anuales del IGLC fueron de mucha ayuda. Se envió un mensaje por correo electrónico de invitación a cada participante seleccionado, en total fueron 265 expertos invitados, tomando la previsión de informar que se trata de una participación anónima, sin embargo, para efectos de la custodia de la información, cada encuesta está debidamente identificada.

Con seis de los expertos internacionales se tuvo un intercambio más cercano, ellos se interesaron en conocer más a fondo la investigación para luego dar respuesta a la encuesta. Con uno de ellos la investigadora sostuvo una reunión personal con ocasión de su visita a Colombia en el transcurso de la investigación, reunión que abordó cada una de las preguntas del cuestionario recibiendo una valiosa retroalimentación por parte del experto con experiencias particulares. Con cuatro de los expertos se sostuvo una conversación por medio del correo electrónico quienes también preguntaron por el alcance de la investigación e hicieron una generosa contribución a manera de recomendaciones y con uno de ellos, se estableció una amplia discusión por video conferencia con respecto de la Ingovernabilidad de los proyectos de construcción, discusión que también aportó a la construcción del modelo.

Cinco de los expertos invitados a la consulta tuvieron la deferencia de escribir a la investigadora expresando que no estaban interesados en participar en la consulta y algunos aportaron sus razones para no hacerlo: “Encuentro que las encuestas de esta naturaleza tienden a no arrojar resultados perspicaces y toman, por supuesto, mucho tiempo”, “una percepción sobre la utilidad de las encuestas y una encuesta muy larga”; “Muchas gracias por su correo electrónico, pero no soy un fan de la construcción lean. Por lo tanto, no puedo responder tu encuesta”, “Comencé a completar la encuesta, pero me detuve cuando me di cuenta de que no entendía la base para calificar los diferentes aspectos, atributos, etc. Con quizás la excepción de la evaluación comparativa externa, todos son parte del progreso en un viaje sin complicaciones. Uno no es más importante que el otro...”, “Siempre estoy listo para ayudar a los estudiantes de Lean Construction en su investigación, pero odio los cuestionarios”. Todas estas razones son consideraciones importantes para tener en cuenta en investigaciones futuras, para diseñar instrumentos más eficientes para la recolección de información y lograr involucrar la valiosa opinión de estos expertos.

La encuesta fue atendida por 111 profesionales familiarizados con LC. El mayor grupo está compuesto por Ingenieros Civiles, un 85%, Figura A1.16, lo cual muestra que estos profesionales están asumiendo la tarea del desarrollo de LC en las organizaciones de construcción como parte del alcance de la profesión de Ingeniero Civil, de igual manera Arquitectos e Ingenieros Industriales también hacen parte de los profesionales relacionados con LC. Se presenta una variedad relacionada con la ocupación de los participantes, el 29% corresponde a Profesores universitarios e investigadores, le siguen los Profesionales Practicantes con un 27% quienes trabajan en campo, los consultores con un 21% que apoyan los procesos de implementación y crecimiento LC, los miembros de la Alta dirección con un 11 % que promueven y apoyan los procesos LC y aquellos participantes dedicados exclusivamente a procesos de investigación con un 11% de la muestra, Figura A1.17.

Figura A1.16. Profesiones de los expertos.

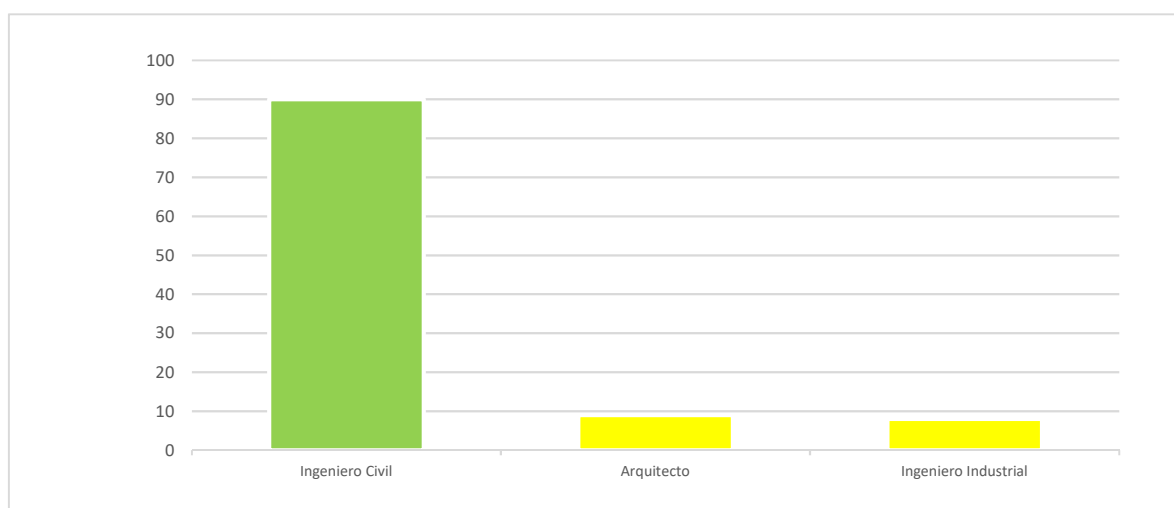
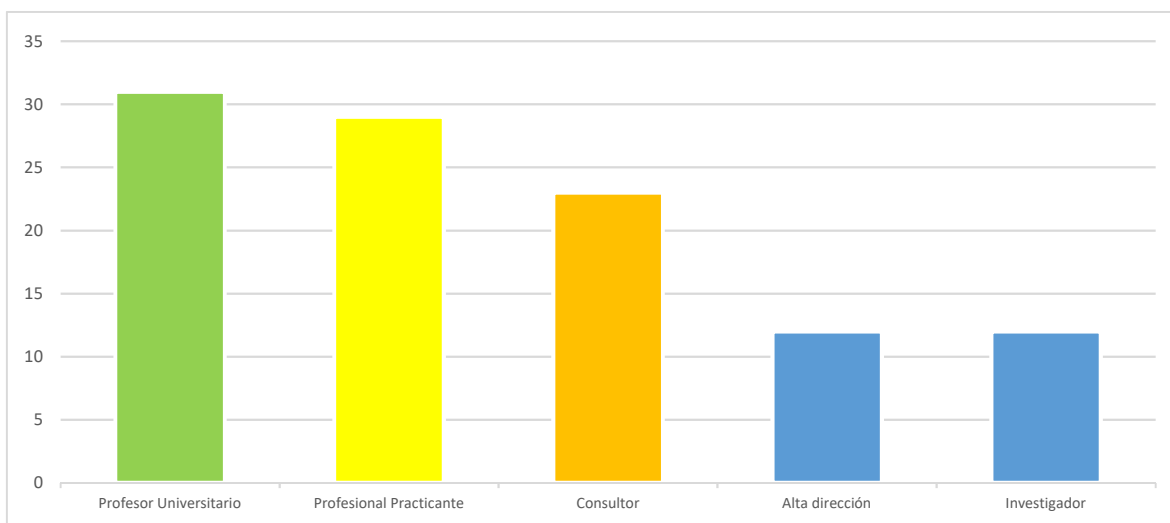
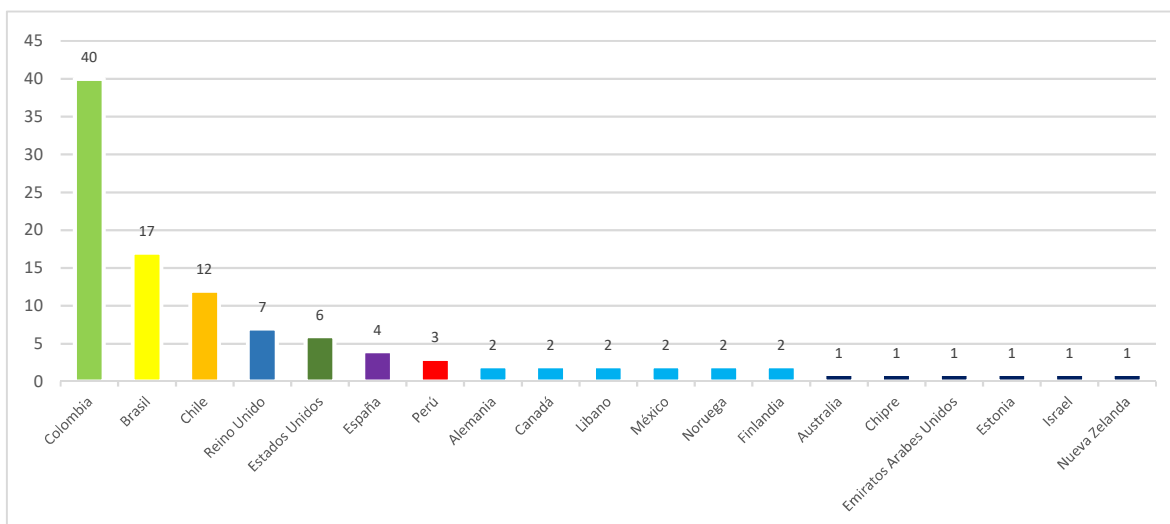


Figura A1.17. Ocupación de los expertos.



Se recibieron respuestas de participantes en cuatro continentes y 19 países. Tiene una alta participación el grupo de profesionales colombianos con un 40% con respecto del 60% de los participantes internacionales. En la Figura A1.18 se identifican los países donde se encuentran ubicados los participantes y la cantidad de respuestas por cada país.

Figura A1.18. Ubicación de los participantes en la encuesta.



Los participantes cuentan con experiencia general mayor a 6 años, personas conocedoras de las actividades de producción en la construcción. El 78% de los participantes cuenta con

experiencia en la construcción entre 6 y 25 años y un 22% con experiencia general superior a 25 años, Figura A1.19. El 66% de los participantes cuenta con experiencia en LC entre 4 y 10 años (en el rango de 0 a 5 Años, el menor número de años de experiencia LC reportado es de 4 años), si se amplía el rango de observación se puede evidenciar que el 93% corresponde a profesionales con experiencia entre 4 y 20 años. Profesionales LC entre 21 y más de 25 años de experiencia en LC corresponden al 7% de los participantes, Figura A1.20.

Figura A1.19: Experiencia general de los participantes de la encuesta

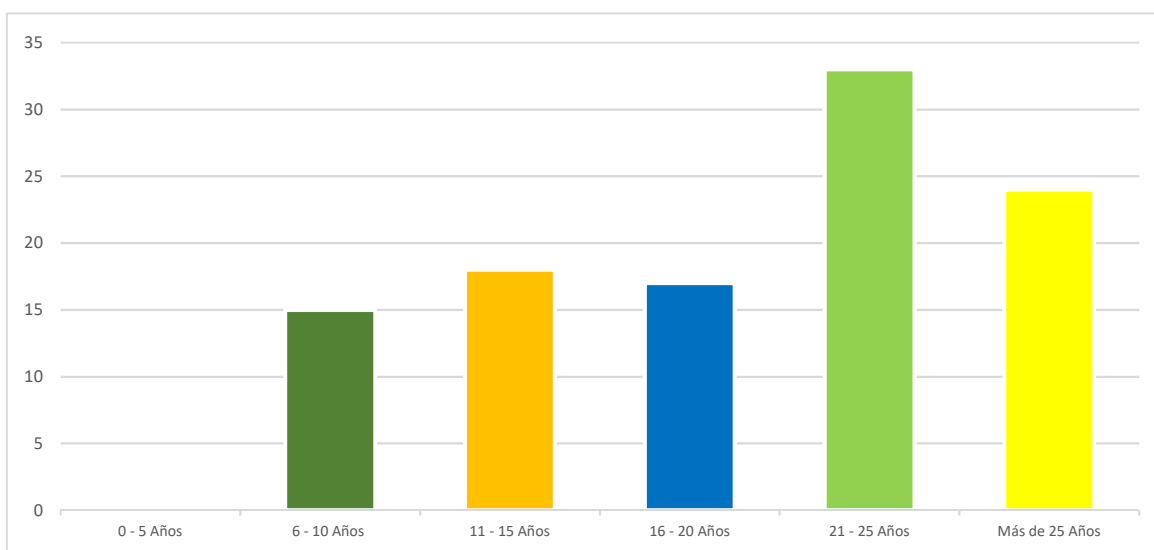
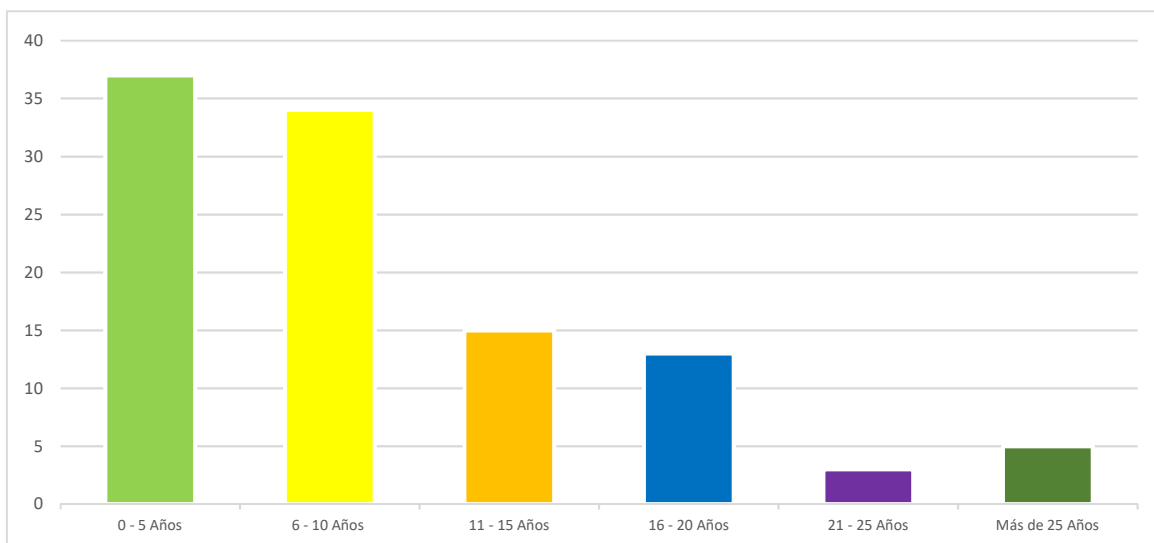


Figura A1.20: Experiencia en LC de los participantes de la encuesta



Análisis de los datos recogidos

En el capítulo 4 se presenta el análisis de datos para cada una de las actividades de recolección de información y su relación con la información necesaria para el desarrollo de la investigación. La información obtenida de las entrevistas de la Etapa I complementa la información obtenida de las referencias bibliográfica para sustentar dos temas que conectan conceptos de producción de manufactura con la producción en construcción y un tema relacionado con la implementación de LC.

2.6 Estrategia de validación y fiabilidad

La validación en la investigación se lleva a cabo en varios momentos en los cuales se busca demostrar la veracidad de los resultados para la obtención de una herramienta confiable para el propósito previsto. Un primer momento está relacionado con la obtención de la información, la disponibilidad de una muestra adecuada de participantes para cada método de recolección de información, en un segundo momento la validación de los datos colectados por medio la verificación de la robustez del modelo SEM y la convergencia de la simulación que se realiza para la identificación de los perfiles de madurez.

2.7 Puntos clave de la sección

En esta sección se ha presentado la metodología con la cual se desarrolla el estudio haciendo énfasis en los métodos de recolección de la información, mostrando su utilidad en cada uno de los momentos de la investigación. De igual manera se presenta la información relacionada con el perfil de los expertos consultados y otra información de interés.

Anexo 4.1

Modelo de Ecuaciones Estructurales para el estudio de la Madurez de Lean Construction en la Gestión de Producción de Proyectos de Construcción

4.1 Modelos de ecuaciones estructurales

Para realizar el estudio de fenómenos complejos, como algunos fenómenos sociales, psicológicos y en particular el fenómeno de la madurez que aborda esta investigación, se utilizan métodos multivariados. Corrientemente usan técnicas de regresión múltiple, el análisis factorial, el análisis multivariante de la varianza, y el análisis discriminante para abordar este tipo de análisis. Sin embargo, su limitación está en que solo pueden examinar una relación al tiempo, incluso el análisis multivariante de la varianza el cual solo representa una relación entre variables dependientes e independientes (Hair, Anderson, Tatham y Black, 1995) (Cupani, 2012), estas limitaciones plantean la necesidad de utilizar técnicas de mayor nivel que superen las limitaciones de las técnicas mencionadas como los SEM.

Los SEM han sido utilizados, sobre todo en el campo de las ciencias sociales en la evaluación de variables no observables a partir de variables observables, además permiten identificar y analizar relaciones entre estas variables no observables. Son una familia de modelos estadísticos multivariantes que pueden ser utilizados para estimar el efecto y las relaciones entre múltiples variables, es una combinación de algunas técnicas multivariadas como la regresión múltiple, el análisis de caminos, o path analysis, y el análisis factorial (Kahn, 2006). Permiten estudiar simultáneamente relaciones de dependencia entre variables dependientes e independientes, siendo muy importantes las relaciones en las cuales una variable dependiente se convierte en independiente. Otro análisis que facilitan los SEM es la identificación de los efectos distintos de las mismas variables en cada una de las variables dependientes (Hair et al., 1995).

Los SEM dan más flexibilidad a los modelos de regresión. Combinan la regresión múltiple y el análisis factorial con cuya información resultante se pueden evaluar interrelaciones de dependencia, además de considerar los efectos del error de medida sobre los coeficientes estructurales al mismo tiempo (Cupani, 2012). Matemáticamente estos modelos son más

complejos de estimar que otros modelos multivariantes como los de Regresión o Análisis factorial exploratorio, es algo así como resolver varios modelos de análisis factorial al mismo tiempo. Los SEM tienen la capacidad de estimar y evaluar la relación entre las variables latentes, así como la validez de cada una de ellas. Se pueden utilizar una variedad de medidas para representar el constructo y controlar el error de medición específico de cada variable, a diferencia de otras técnicas de análisis en las cuales los constructos pueden ser representados con un único resultado y no se puede modelar el error relacionado con la medición.

En la construcción del SEM se propone el tipo y dirección de las relaciones que se espera encontrar entre variables en el modelo. Así, luego de proponer el modelo, se estiman los parámetros de las relaciones propuestas a nivel teórico. Un SEM puede ser utilizado como modelo Confirmatorio si a partir de la teoría se busca confirmar las relaciones usadas como base del modelo, o Exploratorio si lo que se busca es identificar precisamente las relaciones entre las variables según la información contenida en ellas. Estos modelos no prueban la causalidad, solo ayudan a seleccionar hipótesis causales relevantes apoyadas en los datos, de tal manera que de las relaciones que se proponen, se seleccionan aquellas que representan los datos recolectados para el experimento (Weston y Gore, 2006). El SEM está compuesto por dos “sub-modelos”, el modelo de medida y el modelo estructural.

El modelo de medida establece la relación entre las variables latentes, para el SEM de la investigación corresponden a los factores de madurez (FM) y sus indicadores (Atributos), el Modelo de Medida o Modelo Externo (Outer Model), obedece las reglas del Análisis de Factores. En la Figura A4.1.1 se ejemplifica el modelo de medida del SEM haciendo uso de la estructura del modelo de la investigación. El objetivo del modelo de medida es confirmar qué tan correlacionadas están los Atributos (que tan bien cavarían) para identificar la variable latente (FM). En la medida en que estas variables cuenten con altos valores de correlación, indica que el investigador ha acertado en las relaciones entre las variables (Weston y Gore, 2006). El modelo que relaciona los FM es el Modelo Estructural o Modelo Interno (Inner Model). En este modelo se describen las relaciones entre ellas, “es una extensión de varias técnicas multivariantes como la regresión múltiple, el análisis factorial y el análisis de senderos”, la Figura A4.1.2 muestra el modelo interno tomando como ejemplo el modelo para el SEM de la investigación. Uno de los supuestos fundamentales del SEM es que las

variables dependientes tienen cierta variación no explicada por la variable latente que es atribuible al error de medición (Cupani, 2012) y la varianza del error debe ser modelada.

Supuestos del modelo: Son los supuestos más relevantes.

- Relación de colinealidad entre variables,
- Las variables independientes afectan a la variable dependiente en forma aditiva, sus efectos se suman,
- Los modelos son recursivos, no se presentan relaciones de reciprocidad entre variables. La relación causa – efecto fluye en una dirección.
- Los errores no se correlacionan con las variables independientes ni se correlacionan entre sí,
- Las variables observadas han sido medidas directamente sin error.

Figura A4.1.1 Modelo de Medida u Outer Model.

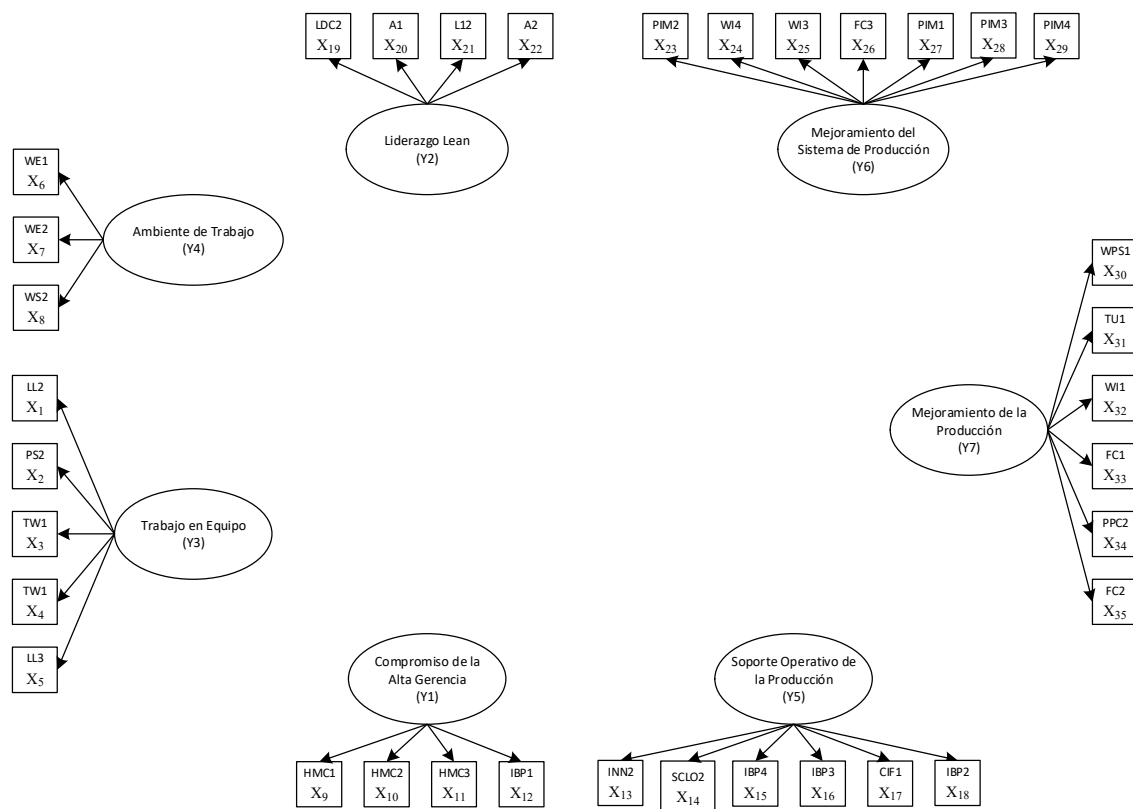
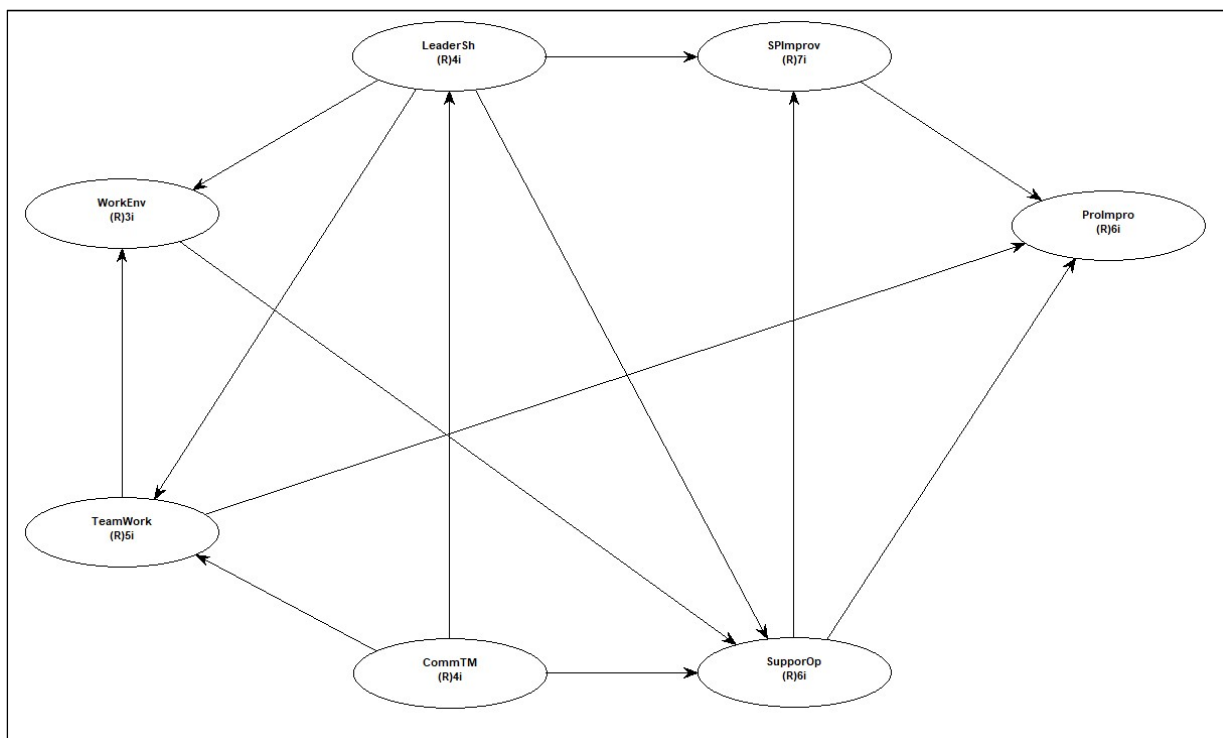


Figura A4.1.2. Modelo de Estructural o Inner Model.

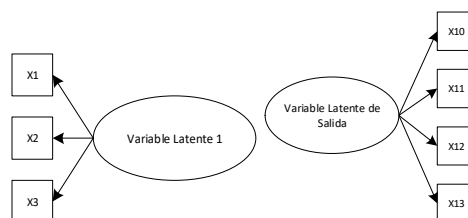


4.1.1 Contexto Teórico Relacionado con Modelos de Ecuaciones Estructurales

A continuación, se presentan algunas definiciones importantes relacionadas con el SEM.

- **Variables observables o manifiestas:** Se miden directamente de un experimento diseñado para obtener su información, se representan por cuadrados y se asignan letras X. Figura A4.1.3.

Figura A4.1.3. Variables Observadas agrupadas en Variables Latentes, relaciones reflexivas.



- **Variables no observables o latentes:** No pueden ser medidas directamente, se miden por medio de las variables observadas. Representan conceptos unidimensionales, constructos, que están alineadas con la teoría del tema de interés. Se representan por círculos o elipses y se usan letras griegas ξ para su condición como endógena y η para su condición como exógena.

Una variable puede tener las dos funciones, exógena y endógena, esto configura un efecto mediador.

- **Variable exógena:** También denominada independiente. No reciben impacto de otra variable, de ella solo salen flechas. Se encuentran en el límite del modelo. Se refiere a las variables observadas. Transmiten su variabilidad al interior del modelo, sin embargo, no se especifica la fuente de variación que da lugar a ellas. Estas variables son causa para variables endógenas.
- **Variable endógena:** Es una variable dependiente o también denominada explicada. Reciben el efecto de otras variables, a ella llegan flechas. Este tipo de variables se caracteriza por explicar su variabilidad en términos de otras variables que pueden ser exógenas o endógenas. Estas variables son efecto de otras, sin embargo, pueden ser causa de otras variables dependientes.

Relaciones entre Variables

Las flechas de una dirección representan el efecto directo de una variable sobre otra, la hipótesis. El origen de la flecha es la causa y la punta de la flecha el efecto. Una relación recíproca entre variables se representa por dos flechas en sentido contrario. Y la correlación entre variables por una flecha curva bidireccional.

Las relaciones entre las variables observadas y las variables latentes se establecen con flechas que salen de la variable latente hacia las variables observadas indicando que las variables observadas están correlacionadas, esta es una relación reflexiva e indica que la variable latente es causada o explicada por las variables observadas. Si la flecha va de la variable observada a la variable latente, esto indica que las variables son independientes y no hay ninguna correlación entre ellas. Es una relación formativa, las variables observadas explican a la variable latente.

No se puede hablar de que haya correlación entre variables latentes, lo que hay entre ellas es una relación causa efecto. Algunas variables latentes se explican a partir de otras latentes y pueden ser dependientes o independientes según la posición de estas en el modelo.

- **Errores:** Se representa como variables y se denotan con la letra griega δ o ζ , y se dibuja una flecha en dirección de la variable con la cual se relacionan. Los errores corresponden a las causas de una variable que no fueron consideradas.
- **Método de estimación del modelo:** La estimación de un modelo de ecuaciones estructurales se puede realizar por dos métodos: Análisis de covarianzas (el cual integra el análisis de senderos, análisis de componentes principales y análisis de factores) o análisis de varianzas (o análisis de componentes).
- **Análisis de varianzas:** Llamado también análisis de componentes, desarrollado por Herman Wold bajo el nombre de Mínimos cuadrados parciales o PLS (Partial Least Squares) (Tenenhaus, Vinzi, Chatelin, & Lauro, 2005), es una generalización del Análisis de componentes principales. Es un método de modelado lineal para evaluar la relación entre campos, se prueba si el valor objetivo de media varía entre combinaciones de categorías de dos entradas. Si la variación es significativa, existe un efecto de interacción.
- **Análisis de covarianzas:** Desarrollado por (Jöreskog, 1993), es una generalización del Modelo de Senderos, Análisis de Componentes Principales y Análisis de Factores. La covarianza es un valor que indica el grado de variación conjunta de dos variables aleatorias respecto a sus medias.
- **Relación reflexiva:** Se indica con la flecha que sale desde la variable latente hacia la variable observada. Indica que hay correlación entre las variables observadas. Figura 4.3.
- **Relación Formativa:** Esta relación se indica con la flecha que va desde la variable observada a la variable latente. Indica que no hay correlación entre las variables observadas, ellas son independientes entre sí.

Tipos de Relaciones entre las Variables del Modelo

Estas relaciones pueden ser de cinco tipos: covarianza, efectos directos, efectos indirectos, efecto de conjunto y efecto espúreo. En esta investigación se consideran solamente aquellos que no contemplan reciprocidad entre las variables.

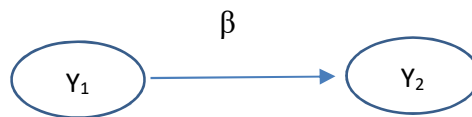
- **Covarianza:** Análoga a la correlación. Es una relación no direccional entre las variables latentes independientes. Se representa por una flecha con doble punta. En esta investigación no se proponen este tipo de relaciones. Figura A4.1.4

Figura A4.1.4. Esquema de Covarianza.



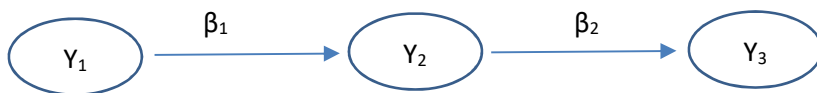
- **Efecto directo:** es la relación entre la variable latente y la variable observada o entre dos variables latentes, esta relación es similar al análisis de regresión múltiple. Se representa por una flecha unidireccional. Esta flecha solo indica dirección, no causalidad. Figura A4.1.5

Figura A4.1.5. Esquema del Efecto Directo.



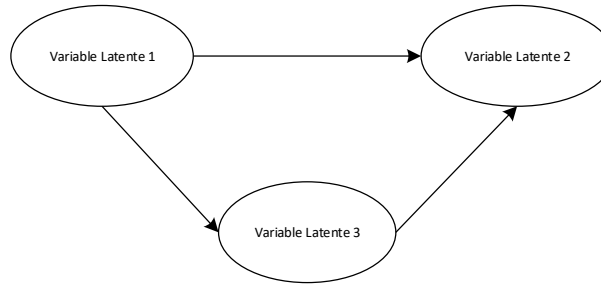
- **Efecto indirecto:** Este efecto puede ser de dos tipos, mediador o moderador. Se presentan entre variables latentes. Figura A4.1.6.

Figura A4.1.6. Esquema del Efecto Indirecto.



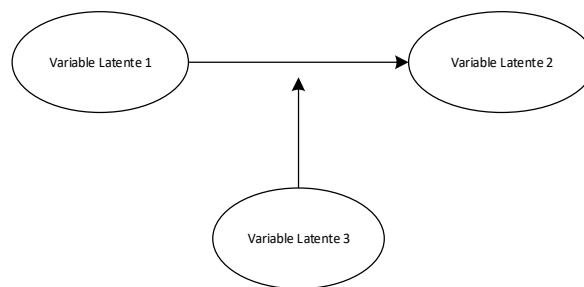
El efecto mediador corresponde al efecto de una variable latente independiente en una variable latente dependiente mediado por una o más variables latentes (Baron & Kenny, 1986). Figura A4.1.7

Figura A4.1.7. Esquema del Efecto Mediador.



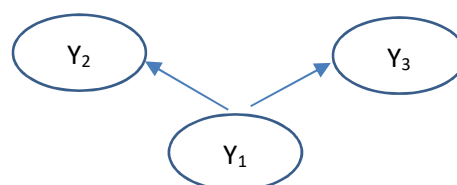
El efecto moderador se da en la relación que hay entre dos variables latentes impactada por una variable latente (moderadora). En este efecto, la variable moderadora afecta la dirección y/o la fuerza de la relación entre una variable independiente o predictor y una variable dependiente o criterio (Baron & Kenny, 1986). Figura A4.1.8.

Figura A4.1.8. Esquema del Efecto Moderador.



- **Efecto de Conjunto:** Se refiere a las variables exógenas que presentan covariación, donde no puede establecerse claramente en qué dirección se presenta la influencia. Este efecto no se considera en esta investigación.
- **Efecto espúreo:** Este efecto se produce en dos o más variables latentes endógenas a causa de una variable latente exógena. La covariación es debida a una causa común. Figura A4.1.9

Figura A4.1.9. Esquema del Efecto Espúreo.



4.1.2 El Proceso de Construcción del Modelo

El Modelo de Ecuaciones Estructurales (SEM) permite resolver dos problemas: El primero, la necesidad de revelar las relaciones entre todos los elementos categorizados, identificar las interacciones o las razones de causalidad entre ellos. Y el segundo, entender la función de cada uno de los elementos en el proceso de madurez con el fin de conducir el desarrollo del modelo de evolución que es el interés de la tesis.

Existen tres estrategias para el desarrollo del SEM:

- **Modelización confirmatoria:** Se especifica el modelo aislado y se utiliza el SEM para evaluar, por medio de los resultados estadísticos, su desempeño o ajuste. Este modelo probablemente es uno de muchos posibles modelos que pueden ser propuestos y no necesariamente es el “mejor”, lo que se denomina un sesgo confirmatorio.
- **Modelos rivales:** Permite evaluar el modelo propuesto con respecto de diferentes modelos alternativos e identificar modelo que permita el mejor nivel de ajuste y por tanto seleccionar el “mejor” modelo.
- **Desarrollo del modelo:** Con un modelo propuesto, se busca mejorarlo sistemáticamente al modificar el modelo de medida y/o el estructural. Aquí se proponen modelos diferentes para encontrar uno nuevo.

Esta investigación utiliza la estrategia del Desarrollo del modelo. El modelo propuesto fue especificado con un arreglo de variables observadas que se agrupan y explican alrededor de variables latentes. Con ayuda del análisis factorial se confirma que la ubicación de las variables observadas en cada una de las latentes fuera consistente con su aporte de variabilidad a cada una de ellas. Se propusieron las relaciones a probar entre ellas, estas relaciones se fueron revisando diferentes configuraciones de relaciones hasta encontrar la que, a juicio de la investigadora, representaba el mejor ajuste y la mejor configuración de relaciones para el estudio.

4.2 Recolección de Información

Un instrumento de medida debe sustentar Relevancia, Congruencia, Suficiencia y Claridad. La información recolectada debe ser objeto de una validación racional y una validación estadística. Demostrar que con la revisión de bibliografía se surte la validación racional y contrastar con juicio de expertos.

4.2.1 Instrumento para Recolección de Información

Se desarrolla la encuesta con 48 atributos y se solicita la participación de 256 expertos LC: investigadores, practicantes y profesores, de los cuales respondieron 111 expertos alrededor del mundo. Para la identificación de estos expertos, se hizo uso de las referencias utilizadas en esta investigación en el proceso de revisión de bibliografía. Con base en esas referencias se fueron incluyendo otros expertos que aparecen como coautores en las investigaciones referenciadas. También se hizo uso de la red profesionales “LinkedIn” para encontrar contactos de otros expertos en LC como parte del círculo profesional de expertos en esa red. Los 48 atributos se agruparon inicialmente en 16 FM Tabla A4.1.1 que más adelante se agrupan en 7 FM.

Tabla A4.1.1 Factores Evaluados en la Encuesta.

Factores de la Primera parte de la Encuesta		Factores de la Primera parte de la Encuesta	
1	Actitud y cultura	9	Seguridad en el sitio de trabajo
2	Aprendizaje y desarrollo de competencias en todos los niveles	10	Utilización de herramientas Lean Construction
3	Trabajo en equipo	11	Innovación
4	Liderazgo Lean	12	Compromiso de la Alta Dirección
5	Solución de problemas	13	Procesos internos de negocio
6	Cumplimiento de los principios Lean Construction	14	Comunicación y flujo de información
7	Sistema de planeación y control de la producción	15	Cadena de suministro y operaciones logísticas
8	Estandarización de los procesos de trabajo	16	Ambiente de trabajo

Es muy importante entender al comparar los siete FM obtenidas del PCA para el SEM, que en ellas se integran los conceptos que se pretendían agrupar en estos 16 FM. Esto es una

ganancia para el modelo, pues se desarrolla con un número menor de variables, lo que lo contribuye a la elaboración de un modelo más compacto y robusto.

Como se explicó anteriormente, se preguntó en la encuesta por la importancia de los FM y los Atributos para la madurez LC en la GPC. La escala utilizada fue (Likert, 1932):

- 1 - El Atributo no es importante en la madurez de LC en la GPC
- 2 - El Atributo es ligeramente importante en la madurez de LC en la GPC
- 3 - El Atributo es importante en la madurez de LC en la GPC
- 4 - El Atributo es muy importante en la madurez de LC en la GPC
- 5 - El Atributo es extremadamente en la madurez de LC en la GPC

4.2.2 Validación Racional

Con la aplicación del Índice de AIKEN a los 55 Atributos identificados inicialmente (L. R. Aiken, 1980) (L. Aiken, 1985) se confirman 48 Atributos para la encuesta a expertos. De acuerdo con la recomendación del método, se requiere de un mínimo de 8 expertos el uso de este método. Se cuenta con los ocho expertos: cuatro de ellos en Colombia y cuatro en Santiago de Chile. En ella se preguntó en una encuesta realizada personalmente, si el Atributo es importante para ser considerado en el estudio en una escala de 1 a 10. Por parte de los expertos, no fue sugerido ningún Atributo adicional. Con este índice se eliminaron del listado de Atributos siete de ellos y se construye el formulario para la encuesta. Anexo A4.4.

Se considera que si en la aplicación de la encuesta, alguno de los Atributos fuese calificado en el nivel 1 por el 51% de los expertos, este Atributo se elimina del estudio. Luego de aplicar la encuesta a los expertos, no se presentó que alguno de ellos fuese calificado de manera que amerite su eliminación del estudio, sin embargo, más adelante al usar el SEM se reducen el número de Atributos de 48 Atributos a 35.

Los 35 Atributos conforman el modelo de medida. Los 13 Atributos no considerados, no se tienen en cuenta para la construcción del SEM. Por medio de la validación estadística se confirman que estos Atributos responden a aspectos similares. Sin embargo, no se eliminan del estudio, ellos serán utilizados más adelante, en una investigación futura, para el desarrollo de la herramienta de evaluación del estado actual de madurez de proceso de PPC. Los

Atributos no considerados se presentan en la Tabla A4.1.2. En la columna de la derecha de esta tabla se presenta el Atributo con el cual está asociado el Atributo retirado.

Tabla A4.1.2. Los 13 Atributos retirados para la construcción del SEM relacionados con el Atributo que se conserva para la construcción del modelo.

Atributos incluidos en el SEM		13 Atributos retirados para la construcción del SEM	
6	Formación en la Filosofía LC	4	Forma de pensar
7	Desarrollo de los equipos de trabajo	5	Competencias de las personas
13	Solución de problemas y aprendizaje conjunto	12	Entendimiento del problema
15	Mejoramiento continuo	27	Implementación de un sistema de gestión y control de calidad
16	Flujo continuo	20	Reducción del desperdicio
26	Desarrollo de un sistema Pull	25	Desarrollo y operación de un sistema de planeación y control de la producción
28	Desarrollo de estándares	29	Mejoramiento y sostenibilidad de estándares
31	Aprendizaje y entrenamiento para la seguridad en el sitio de trabajo	30	Preocupación por la seguridad en el sitio de trabajo
32	Conocimiento y selección de herramientas Lean Construction	33	Nivel de utilización de herramientas Lean Construction
34	Gestión del conocimiento	35	Integración de nuevos desarrollos
43	Sistemas de información	44	Flujo de información
46	Operaciones logísticas	45	Gestión de la cadena de suministro
47	Participación de las personas en la construcción del ambiente de trabajo	48	Construcción del ambiente de trabajo - Interacción en el entorno de trabajo (calidad de vida en el ambiente de trabajo)

4.2.3 Validación Estadística de la Información Recolectada

En este punto se verifica la validez estadística de la información obtenida para las 48 variables con el cálculo del índice Alfa de Cronbach (Cronbach J.Lee, 1951). El Alfa de Cronbach permite medir la fiabilidad de la escala de medida para la magnitud inobservable, que es la Madurez, construida a partir de las 48 variables observadas. “En particular, las n variables deberían realizar mediciones estables y consistentes con un elevado nivel de correlación entre ellas” (Cronbach J.Lee, 1951).

En la medida en que el valor obtenido se aproxime a 1.0 mayor es la fiabilidad de la escala. En este caso, para las 48 variables, se obtiene un valor para el Alfa de Cronbach 0.960, índice calculado con ayuda del software SPSS18. El criterio de aceptación considera que valores del Alfa de Cronbach superiores a 0,7 son suficientes para garantizar la fiabilidad de la escala. Con este valor se confirma la fiabilidad de la escala y se verifica que la selección de expertos

ha sido apropiada (Cronbach J.Lee, 1951). El análisis de los estadísticos relacionados con el modelo se presenta en la sección correspondiente a la evaluación del ajuste del modelo.

4.2.4 Valores Perdidos y Valores Fuera del Rango

La matriz de datos obtenidos para este estudio no presenta datos perdidos o “Missing Data” ni valores fuera del rango de calificación. Esto se debe a que la encuesta, al realizarse por medio de un formato electrónico permitió seleccionar en su diseño una instrucción que no permitía el envío del formulario hasta que no se respondieran en total de las preguntas.

De igual manera no hay presencia de valores fuera del rango de evaluación, entre 1 y 5, ya que la calificación se selecciona de un set de opciones y nuevamente la herramienta no permite una calificación distinta.

4.3 Construcción del Modelo de Ecuaciones Estructurales

De acuerdo con (Cupani, 2012) expertos en SEM consideran seis pasos que se deben seguir para aplicar esta técnica:

- Especificación del modelo,
- Estimación de parámetros,
- Identificación del modelo,
- Evaluación del ajuste,
- Re-especificación del modelo,
- Interpretación de resultados (Kaplan, 2000)(Kline, 2011)

4.3.1 Especificación del Modelo

Se propuso un primer SEM empírico, el mostrado en las Figura A4.1.10 y A4.1.11. En este modelo se proponen todas las relaciones posibles con base en la experiencia de la investigadora y de su interacción con los expertos. Este modelo, de acuerdo con el método de SEM debe ser recursivo, lo que implica que las influencias causales tienen que ser unidireccionales y sin que se presenten efectos retroactivos o bucles entre los FM, este no es un modelo causal según la teoría de Dinámica de Sistemas, se basa en regresiones.

Figura A4.1.10. Relaciones propuestas de los Factores de Madurez. Modelo Empírico. Relaciones a ser comprobadas. Inner Model del SLC-MM.

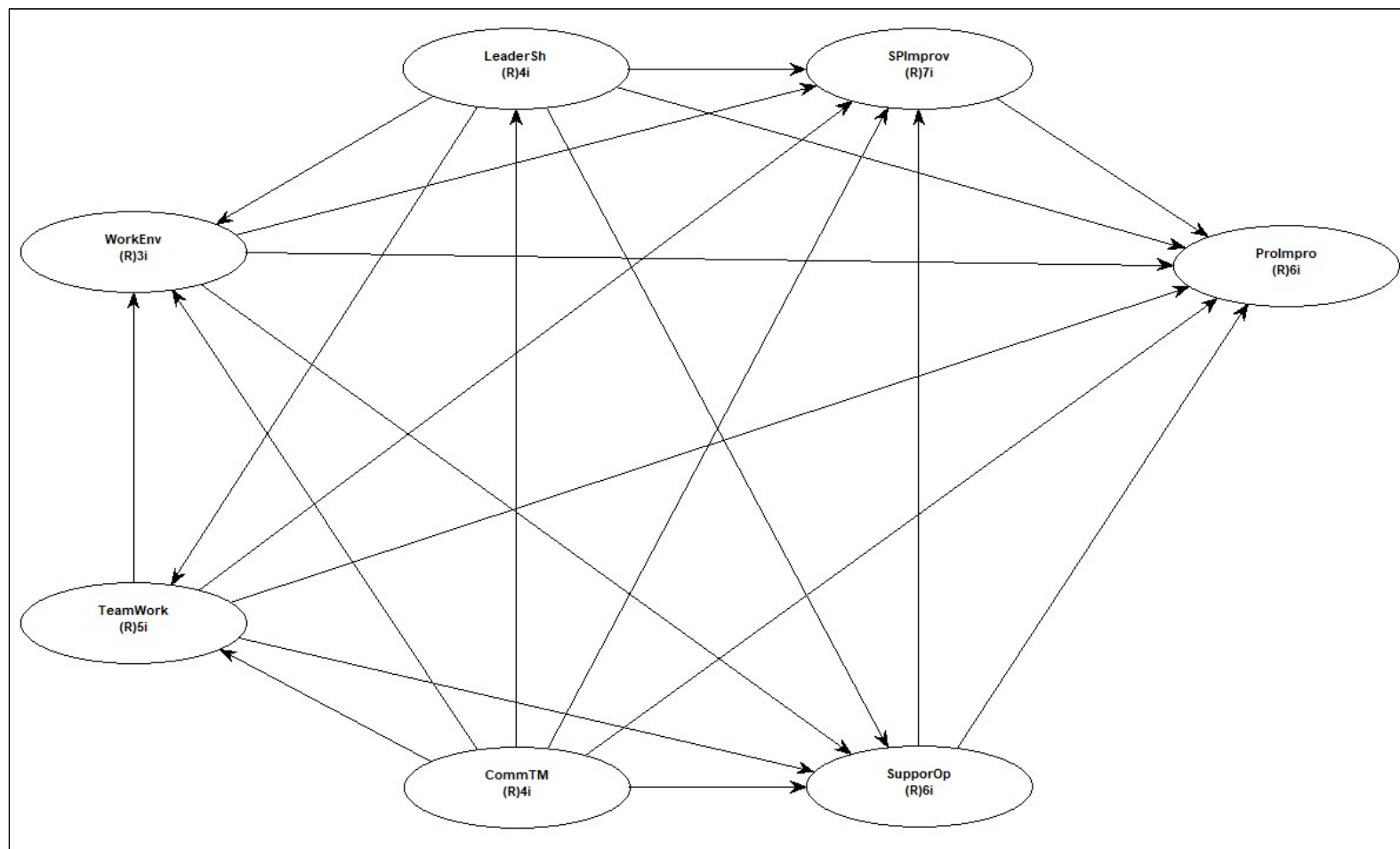
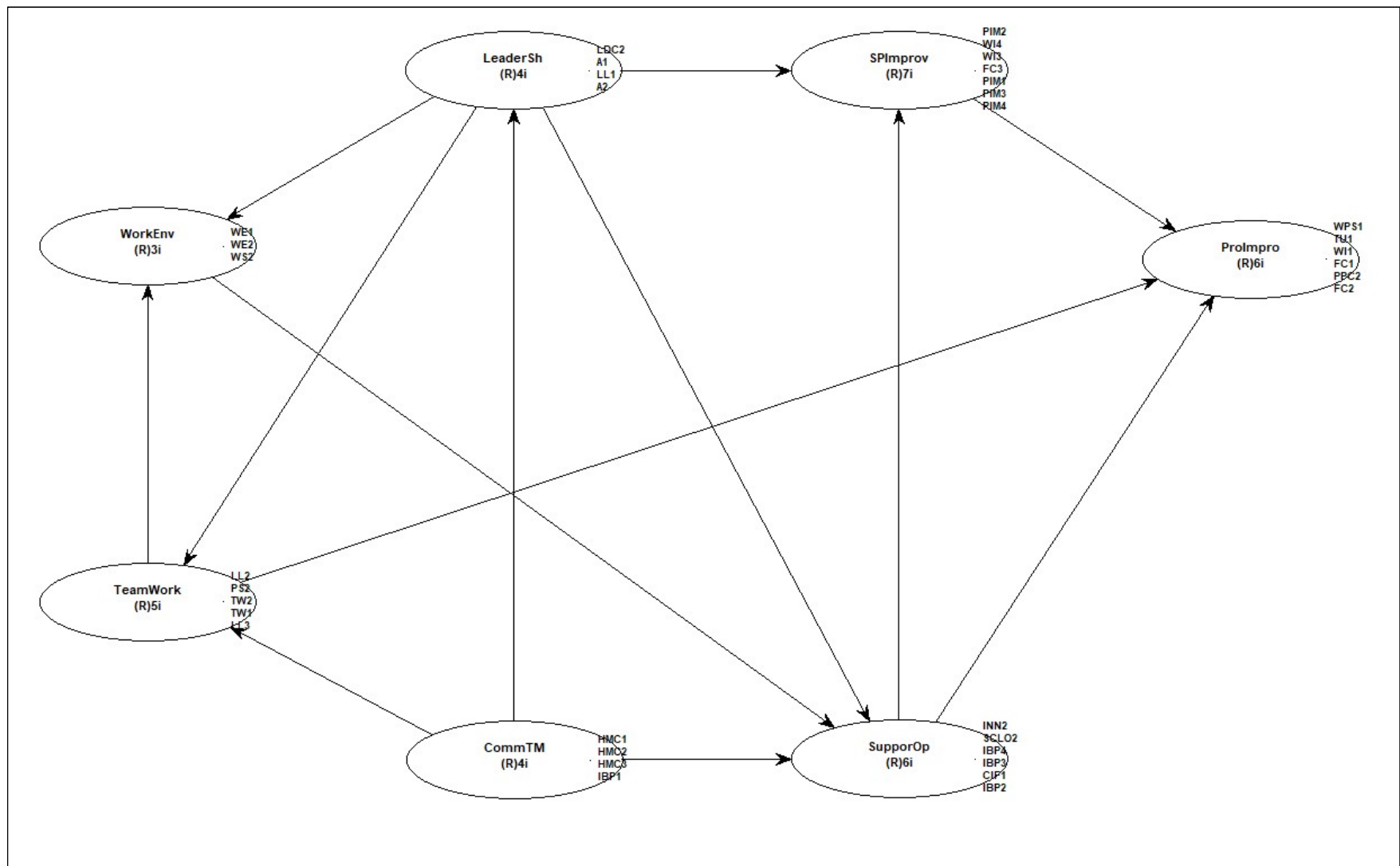


Figura A4.1.11. Atributos Asociados a los Factores de Madurez según su clasificación en las Categorías

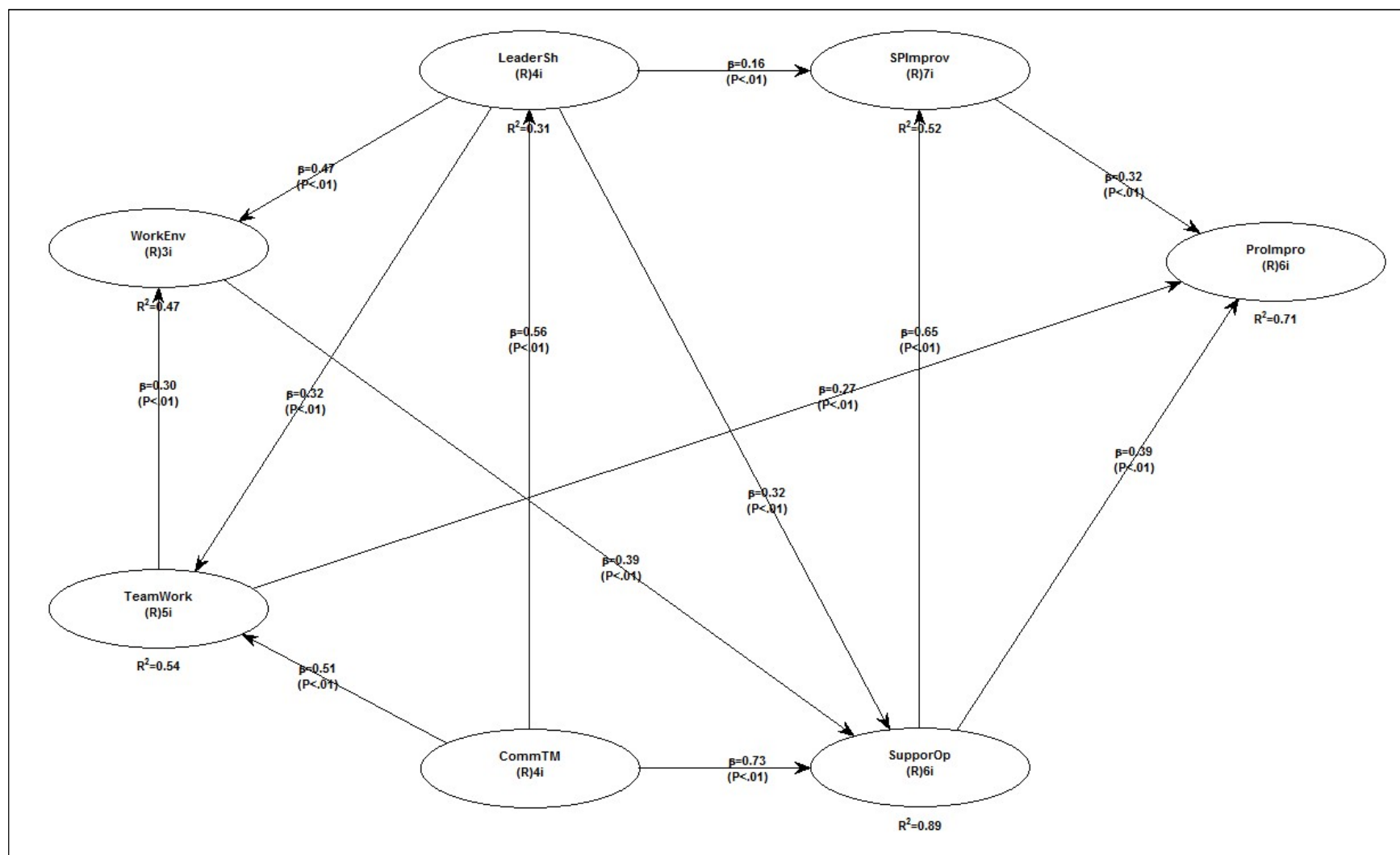


Este modelo se compone de los FM y los Atributos asociados a ellos como se explicó en la sección anterior. Con la agrupación de los Atributos en cada uno de los FM, y las relaciones propuestas entre FM, se identificó el FM con mayor cantidad de interacciones (Las de los Atributos y las relaciones ente este y otros FM). Esto dio como resultado que los FM Mejoramiento del Sistema de Producción (SPImprov) y Mejoramiento de la Producción (ProImpr), ambos cuentan con 12 relaciones. SPImprov con siete relaciones que corresponden a los Atributos que lo explican y cinco relaciones causales referidas a los FM: Liderazgo Lean, Soporte Operativo, Compromiso de la Alta Dirección, Trabajo en Equipo y Ambiente de Trabajo que impactan a este FM. Para ProImpr seis relaciones que corresponden a los Atributos que lo explican y seis relaciones causales referidas a los FM: Liderazgo Lean, Soporte Operativo, Compromiso de la Alta Dirección, Trabajo en Equipo, Ambiente de Trabajo y Mejoramiento del Sistema de Producción que impactan a este FM. Estas relaciones propuestas pueden apreciarse en la Figura A4.1.12.

De acuerdo con (Kline, 2011) para calcular el tamaño de muestra para el Análisis Factorial en este modelo se requiere obtener 120 encuestas como mínimo para contar con una fuente de información confiable. Este autor explica que una muestra adecuada debería tener entre 10 a 20 participantes por parámetro observado. En esta investigación se considera un mínimo de 10 participantes por parámetro, así que, con 12 parámetros de la variable con más relaciones se requieren 120 respuestas.

Se reciben 111 respuestas, un 7.5% por debajo de las requeridas según (Kline, 2011). Se opta por avanzar en la consolidación de la estructura del modelo con estas 111 respuestas. Este paso guarda particular importancia pues, a pesar de que no se cuenta con el número mínimo recomendado de encuestas, con ayuda del software para aplicar el SEM, se descartan relaciones no significativas. De esta manera que se verifican más adelante, con las relaciones significativas que se requieren 90 respuestas. El FM con más parámetros a estimar es el Mejoramiento del Sistema de Producción con nueve relaciones, los siete Atributos y dos relaciones causales de los FM: Liderazgo Lean y Soporte Operativo. De esta manera, las 111 respuestas corresponden a un 23% por encima del requerido.

Figura A4.1.12. Modelo de Ecuaciones Estructurales para la Madurez de LC en la GP



4.3.2 Selección de Variables Observadas para Conformar las Variables Latentes

Con las respuestas de las encuestas y el modelo preliminar, se realizó un Análisis de Componentes Principales (PCA) con los 48 atributos para buscar una forma más eficiente de agrupamiento. La técnica de PCA ayuda a reducir la cantidad de Atributos al agruparlas en FM. La forma de agrupar los Atributos según el PCA no promovía conceptos LC que estuvieran documentados, o a los que hubieran hecho referencia los expertos. Esto implica tomar la decisión de realizar PCA para los Atributos agrupados en cada una de las tres Categorías de Madurez. Esta decisión está fundamentada en el trabajo previamente realizado de agrupación según las categorías propuestas en (Cano et al., 2015).

Al aplicar PCA a los Atributos en las categorías, los FM resultantes representan conceptos conocidos y documentados en LC. Los Atributos altamente correlacionados explican el FM que las agrupa, es su contenido de variabilidad el que aporta a esta definición. Los Atributos de manera individual explican fenómenos particulares de madurez, los cuales reunidos en el FM explican fenómenos de mayor nivel. En este sentido, cuando un Atributo contiene la misma información que otro, uno de ellos es eliminado del conjunto.

Un modelo construido de esta manera busca ser más simple y contener la información precisa que se requiere. El objetivo de la utilización de PCA es la construcción del modelo para esta investigación con un número preciso de FM, los cuales hasta antes de la aplicación de PCA correspondían a 16 variables latentes propuestas. De esta manera se obtuvieron siete FM con 35 Atributos.

Una condición que se exige para el uso de PCA, se refiere a que las variables tienen que distribuirse normalmente, por lo cual los datos se transformaron utilizando el método del logaritmo para cada una de las columnas de datos las variables observadas. Los datos también fueron estandarizados y no hubo necesidad de realizar tratamiento de datos para eliminar valores fuera de rango ni reemplazos por valores faltantes, pues como se explicó anteriormente, no se presentan ninguna de las dos situaciones.

Aquí es importante explicar, que se puede construir el SEM sin realizar previamente un PCA. Este paso es particular para esta investigación, el uso del PCA permitió, un ahorro significativo de tiempo, ya que, al agrupar las variables observadas según el criterio de contenido de variabilidad, fue más precisa la conformación de los constructos. La agrupación

de variables se puede realizar haciendo uso del software WarpPLS, el cual realiza un Análisis Factorial (FA). Este FA se concentra en el modelo de medida y con esta información se puede ir ajustando la selección de variables observadas asignadas a las variables latentes con ayuda de sus cargas factoriales, Tabla A4.1.3. Los conceptos bajo los cuales se agrupan las variables observadas representan de manera muy precisa los conceptos estudiados en la teoría, conceptos con los que se configuran los siguientes FM:

- Compromiso de la Alta Dirección,
- Soporte Operativo a la Producción,
- Ambiente de Trabajo,
- Liderazgo Lean,
- Trabajo en Equipo,
- Mejoramiento del Sistema de Producción y
- Mejoramiento de la Producción.

En la conformación de los FM, el criterio de agrupación de los Atributos corresponde con que los Valores Propios (Eigenvalues) estuvieran por encima de 1.0, esto indica el número de variables latentes que pueden ser obtenidas a partir de las variables observadas. Se consideraron como importantes aquellos factores con un valor mayor o igual a la unidad en sus Valores Propios. Para la conformación de cada FM se consideró el aporte del grupo de Atributos con una variabilidad total mayor a 0.5. Este criterio corresponde con el aporte de variabilidad $R^2=0.5$, o sea un R de 0.7 que ya considera un alto contenido de variabilidad entonces el criterio de inclusión de las variables observadas es mayor o igual al 0.7 de varianza (García, 2011). En la Figura A4.1.12 se muestra la configuración del modelo con la identificación de los Atributos en cada FM.

4.3.3 Creación del Modelo en Ecuaciones Estructurales

Una vez identificados los FM, se precisa la estructura del SEM, se corre el programa y se confirma la correlación entre los Atributos de cada FM con ayuda del FA. El criterio de agrupamiento confirma que estos Atributos se integran al FM con valores de varianza por encima de 0.6 (por debajo de 0.5 indica que no se asocia con el FM). Las cargas factoriales de los FM reflectoras son altas, corresponden a una matriz de estructura (es decir, no girada), y las cargas cruzadas son bajas, estas corresponden a una matriz de patrón (es decir, girada).

En el modelo, un Atributo mostro una CF más alta en un FM diferente al que estaba ubicado, el IBP1. Este se haya con carga factorial 0.616 en el FM Compromiso de la Alta Dirección (CommTM). El FA muestra que estaría mejor ubicada en el Mejoramiento del Sistema de Producción con CF de 0.659. Se probó cambiarla de lugar y el modelo desmejoró su ajuste. Por lo que se regresó al FM original.

Tabla A4.1.3. Cargas factoriales normales de las variables observadas que explican los factores de madurez. Cargas combinadas y cargas cruzadas.

	X_i	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr	SE	Valor P
LL2	X_1	0.715	0.401	0.511	0.362	0.560	0.260	0.525	0.127	<0.001
PS2	X_2	0.768	0.511	0.414	0.344	0.394	0.328	0.465	0.144	<0.001
TW2	X_3	0.792	0.445	0.374	0.312	0.431	0.205	0.384	0.106	<0.001
TW1	X_4	0.737	0.428	0.301	0.280	0.393	0.126	0.341	0.133	<0.001
LL3	X_5	0.710	0.320	0.433	0.418	0.356	0.365	0.549	0.126	<0.001
WE1	X_6	0.453	0.738	0.459	0.480	0.520	0.338	0.448	0.111	<0.001
WE2	X_7	0.403	0.729	0.346	0.361	0.414	0.227	0.394	0.082	<0.001
WS2	X_8	0.385	0.725	0.299	0.403	0.392	0.211	0.454	0.085	<0.001
HMC1	X_9	0.507	0.397	0.828	0.571	0.477	0.369	0.619	0.102	<0.001
HMC2	X_{10}	0.502	0.448	0.832	0.612	0.417	0.472	0.674	0.091	<0.001
HMC3	X_{11}	0.456	0.429	0.718	0.390	0.607	0.287	0.499	0.092	<0.001
IBP1	X_{12}	0.168	0.235	0.616	0.652	0.130	0.659	0.479	0.083	<0.001
INN2	X_{13}	0.310	0.329	0.607	0.725	0.264	0.596	0.558	0.076	<0.001
SCLO2	X_{14}	0.418	0.445	0.562	0.813	0.260	0.579	0.659	0.075	<0.001
IBP4	X_{15}	0.474	0.576	0.520	0.773	0.339	0.420	0.535	0.096	<0.001
IBP3	X_{16}	0.150	0.270	0.478	0.727	0.067	0.674	0.507	0.082	<0.001
CIF1	X_{17}	0.309	0.429	0.555	0.833	0.220	0.609	0.607	0.077	<0.001
IBP2	X_{18}	0.426	0.520	0.640	0.652	0.343	0.299	0.519	0.101	<0.001
LDC2	X_{19}	0.509	0.425	0.386	0.181	0.773	0.234	0.429	0.100	<0.001
A1	X_{20}	0.405	0.400	0.461	0.208	0.767	0.297	0.506	0.111	<0.001
LL1	X_{21}	0.479	0.500	0.531	0.365	0.729	0.341	0.490	0.099	<0.001
A2	X_{22}	0.262	0.421	0.195	0.200	0.617	0.226	0.163	0.096	<0.001
PIM2	X_{23}	0.215	0.188	0.483	0.552	0.311	0.826	0.560	0.089	<0.001
WI4	X_{24}	0.259	0.240	0.425	0.514	0.234	0.804	0.565	0.081	<0.001
WI3	X_{25}	0.263	0.313	0.458	0.529	0.291	0.802	0.630	0.073	<0.001
FC3	X_{26}	0.280	0.251	0.491	0.587	0.226	0.780	0.561	0.084	<0.001
PIM1	X_{27}	0.173	0.280	0.445	0.512	0.277	0.756	0.529	0.082	<0.001
PIM3	X_{28}	0.359	0.352	0.498	0.463	0.468	0.704	0.526	0.120	<0.001
PIM4	X_{29}	0.271	0.245	0.348	0.547	0.197	0.601	0.472	0.091	<0.001
WPS1	X_{30}	0.359	0.306	0.599	0.632	0.261	0.587	0.767	0.085	<0.001
TU1	X_{31}	0.356	0.402	0.646	0.630	0.439	0.629	0.740	0.088	<0.001
WI1	X_{32}	0.385	0.377	0.537	0.537	0.478	0.755	0.739	0.100	<0.001
FC1	X_{33}	0.421	0.477	0.547	0.545	0.347	0.383	0.733	0.072	<0.001
PPC2	X_{34}	0.481	0.528	0.467	0.460	0.437	0.406	0.701	0.115	<0.001
FC2	X_{35}	0.654	0.490	0.515	0.463	0.438	0.423	0.685	0.127	<0.001

Aquí, el criterio de la investigadora juega un papel muy importante pues esas variables muestran más adherencia a las decisiones que toma la Alta Dirección y al mejoramiento del sistema de producción respectivamente.

4.3.4 Estimación de Parámetros

Los parámetros corresponden a las cargas factoriales de los Atributos a cada una de los FM con los que están relacionadas, Los valores de los β entre los FM y los errores asociados a los Atributos y a los FM. El número de parámetros a estimar es la sumatoria de los siguientes.

Parámetros para variables observadas, son 35

Parámetros para las variables latentes, son 7

Los valores de β entre variables latentes, son 13

Errores para las variables observadas, son 35

Errores para las variables latentes, son 7

Numero de parámetros a estimar, $NPE = 35 + 7 + 13 + 35 + 7 = 97$

4.3.5 Identificación del Modelo

Si el modelo teórico está relacionado conforme con el fenómeno que se desea estudiar a juicio del investigador, se procede a su identificación con el fin de asegurar que se pueden estimar los parámetros del modelo. Un modelo está identificado si todos los parámetros lo están, esto significa si hay una solución para cada uno de los parámetros.

Un modelo es *identificado* si cuenta con cero grados de libertad, lo que corresponde a un ajuste perfecto del modelo. Esta solución no tiene interés puesto que no se pueden generalizar los resultados del estudio.

Un modelo es *Sobre-identificado* si consta de más información en la matriz de datos que el número de parámetros a estimar, corresponde a un valor positivo de grados de libertad. Este es el ideal de todos los SEM, disponer de más información que parámetros haya que resolver, obtener el mayor número de grados de libertad posible. Al igual que otras técnicas multivariantes, el investigador se esfuerza por conseguir un ajuste aceptable con el mayor grado de libertad posible. Esto garantiza que el modelo sea fácilmente generalizado.

Un modelo *Sub-estimado* tiene grados de libertad en negativo. Se busca estimar más parámetros de los que se pueden con la información disponible. Para la identificación del modelo de esta investigación, se calculan los grados de libertad del modelo con la siguiente fórmula:

NVO: Numero de Variables Observadas, son 35.

NPE: Numero de parámetros a estimar, son 97

$$GL = (NVO \times (NVO + 1)) / 2 - NPE = GL = (35 \times (35 + 1)) / 2 - 97 = 533 \quad (1)$$

Resultado de la Identificación del Modelo

El modelo cuenta con 533 grados de libertad. Este resultado muestra un modelo sobre-identificado, lo que significa es que existe más información que parámetros a estimar y, en consecuencia, el modelo puede ser estimado y contrastado.

Consideraciones del Resultado de la Identificación del Modelo

Un modelo con más grados de libertad es más parsimonioso. El modelo se ajusta bien a los datos y se demuestra que las asociaciones entre los Atributos y los FM son más importantes.

Validez de la Información para los Factores de Madurez

Es importante verificar la validez de las variables del modelo para posteriormente interpretarlo. No es conveniente interpretar el modelo hasta que no se verifique su validez. Primero se debe asegurar que las variables son válidas y así asegurar que el modelo es válido. El análisis de la información de los Atributos se lleva a cabo con base en la Tabla A4.1.4. Estos índices se validan de acuerdo con la interpretación detallada en el Anexo A4.5 para la validez de los FM del SEM. Los elementos de referencia se presentan a continuación.

R-Squared	$\geq 20\%$
Cronbach's Alpha	≥ 0.7 , El criterio relajado es para Composite reliability ≥ 0.8
AVE	≥ 0.5
VIF	≤ 3.3
Q-squared	> 0.0
Skewness	≤ 3.0
Kurtosis	≤ 5.0 , un criterio más relajado es ≤ 10

Todos los indicadores presentados demuestran la validez de la información de los FM.

Tabla A4.1.4. Estadísticos del SEM. Software WarpPLS 6.0. Coeficientes de los Factores de Madurez.

Estadístico	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
R-Squared	0.539	0.469		0.890	0.311	0.522	0.706
Adj. R-Squared	0.530	0.459		0.887	0.305	0.513	0.698
Composite realib.	0.862	0.774	0.838	0.888	0.814	0.903	0.871
Cronbach's alpha	0.799	0.563	0.738	0.848	0.693	0.873	0.822
Avg. Var. Extract.	0.555	0.534	0.568	0.572	0.525	0.573	0.530
Full collin. VIF	1.975	2.402	3.305	4.103	2.358	2.737	4.298
Q-squared	0.542	0.476		0.654	0.316	0.518	0.707
Min	-5.380	-3.334	-3.652	-3.680	-3.885	-3.544	-3.902
Max	1.271	1.529	1.400	1.760	1.492	1.532	1.449
Median	0.208	0.265	0.069	0.227	0.299	0.170	0.169
Mode	1.271	0.365	1.070	0.021	0.770	-0.193	-0.328
Skewness	-2.154	-1.075	-0.940	-1.044	-1.487	-0.991	-1.353
Exc. Kurtosis	8.051	1.842	0.915	1.738	2.438	0.846	2.258
Unimodal – RS	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Unimodal – KMW	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Normal – JB	No	No	No	No	No	No	No
Normal – RJB	No	No	No	No	No	No	No

4.3.6 Evaluación del Ajuste del Modelo – Prueba de Robustez

Una vez se ha validado la información de los FM de manera individual, se valida el modelo general. Para interpretar los resultados del SEM se analizan cuidadosamente varias pruebas estadísticas y un conjunto de índices para determinan que la estructura teórica propuesta suministra un buen ajuste a los datos empíricos. Este ajuste se verifica si los valores de los parámetros estimados reproducen tan estrechamente como sea posible la matriz observada de covarianza (Kahn, 2006). Corresponde a la prueba de robustez del modelo para realizar la inferencia. Ver Tabla A4.1.5.

Tabla A4.1.5. Ajustes del Programa para Resolver el Modelo.

Missing data imputation algorithm:	Arithmetic Mean Imputation
Outer model analysis algorithm:	Robust Path Analysis
Default inner model analysis algorithm:	Warp3
Multiple inner model analysis algorithms used?	No
Resampling method used in the analysis:	Bootstrapping
Number of data resamples used:	100
Number of cases (rows) in model data:	111
Number of latent variables in model:	7
Number of indicators used in model:	35
Number of iterations to obtain estimates:	8
Range restriction variable type:	None
Range restriction variable:	None
Range restriction variable min value:	0.000
Range restriction variable max value:	0.000
Only ranked data used in analysis?	Yes

Índices de Ajuste y Calidad del Modelo

Con el propósito de medir la eficiencia del SEM, se usa el Análisis General de Resultados mostrado por el software. En la medida en que se genera el modelo, se va ajustando y además de confirmar que los indicadores estudiados anteriormente estaban en los rangos de aceptación, se confirmó con estos análisis generales de resultados las relaciones entre los factores buscando el modelo que presentara el mejor ajuste de acuerdo con estos indicadores.

Así, con base en el modelo inicial se establecen diferentes relaciones que se van explorando hasta obtener el modelo que a juicio de la investigadora represente mejor el fenómeno o constructo general, la madurez, y produjera el mejor ajuste aceptado. Se acepta el modelo ajustado si los indicadores en conjunto presentan mejores resultados con respecto al modelo anterior. El modelo aceptado se presenta en la Figura A4.1.12. Los resultados para este modelo se presentan en la Tabla A4.1.6.

La calidad del modelo, conformado por los FM y sus relaciones, se identifica con ayuda de un grupo de indicadores con los cuales se conoce el nivel de ajuste a los datos obtenidos de los expertos. Estos son 10 indicadores del desempeño del modelo los cuales se presentan en el Anexo A4.6. Con estos indicadores se valida el modelo. Es importante notar que los indicadores cuentan con un Valor $P < 0.001$, mostrando una significancia de la información obtenida de un mínimo del $1 - 0.001 = 0.999$, o el 99.9%. Esto quiere decir que con un nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, que corresponde al nivel de confianza de $1 - \alpha = 0.95$, por tanto,

para este estudio, cualquier Valor P menor que $\alpha = 0.05$ es significativo para el análisis de las relaciones en el modelo. Esto también se verifica con la prueba de hipótesis.

Tabla A4.1.6. Resultados del desempeño del SEM (Archivo de datos: EModel 111 VAR - Robust Path - V1.prj)

INDICADOR	RESULTADO	CRITERIO DE ACEPTACIÓN
Average path coefficient (APC)	0.394	P<0.001
Average R-squared (ARS)	0.494	P<0.001
Average adjusted R-squared (AARS)	0.485	P<0.001
Average block VIF (AVIF)	1.481	acceptable if ≤ 5 , ideally ≤ 3.3
Average full collinearity VIF (AFVIF)	2.998	acceptable if ≤ 5 , ideally ≤ 3.3
Tenenhaus GoF (GoF)	0.522	small ≥ 0.1 , medium ≥ 0.25 , large ≥ 0.36
Sympson's paradox ratio (SPR)	1.000	acceptable if ≥ 0.7 , ideally = 1
R-squared contribution ratio (RSCR)	1.000	acceptable if ≥ 0.9 , ideally = 1
Statistical suppression ratio (SSR)	1.000	acceptable if ≥ 0.7
Nonlinear bivariate causality direction ratio (NLBCDR)	1.000	acceptable if ≥ 0.7

Prueba de hipótesis

La prueba de hipótesis se realiza a todas las relaciones en el SEM, el concepto general es:

La Hipótesis Nula es,

$$H_0: \beta_i = 0, \text{ No existe una relación directa entre las variables latentes}$$

Y la Hipótesis Alterna es,

$$H_i: \beta_i \neq 0, \text{ Existe una relación directa entre las variables latentes}$$

Para realizar la prueba de hipótesis, se calcula el valor de z. Se requiere el calor de la media poblacional y la media muestral, la desviación estándar y el tamaño de la muestra.

$$z = (x - \mu) / (\sigma / \sqrt{n})$$

Al obtener el valor de z, se busca en la Tabla de Probabilidades de la Distribución Normal Estándar y se encuentra lee el Valor P. Este Valor P se compara con el nivel de significancia α definido, que para este caso es $\alpha = 0.05$, y al comparar, se acepta o rechaza la hipótesis nula.

Con Valores P menores de 0.05, NO se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna: “Existe una relación directa y positiva entre las variables latentes”.

Intervalo de Confianza

Para identificar los intervalos de confianza para cada uno de los parámetros de las relaciones entre factores del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Límites del intervalo} = \beta_i \pm Z * \delta$$

Donde, δ es el error relacionado con la medición y se calcula con la expresión $\delta = (\sigma / \sqrt{n})$

Para nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, se calcula el área de la distribución normal sin uno de los lados de la cola, $1 - \alpha/2 = 0.975$, luego se busca Tabla de Probabilidades de la Distribución Normal Estándar valor de Z, el $Z_{\alpha/2}$ correspondiente es de $Z_{\alpha/2}$ que es igual a 1.96.

El Límite inferior del intervalo es:

$$LI = \beta_i - 1.96 * \delta$$

El Límite superior del intervalo es:

$$LS = \beta_i + 1.96 * \delta$$

Si el intervalo de confianza incluye el cero, se tiene la certeza que la β_i NO es significativa.

1.1 Determinación de las Ecuaciones Estructurales

El modelo de medida está conformado por los Atributos que identifican o explican a los FM. Los Atributos se identifican con X_i y los FM con Y_j . Los FM (o variables endógenas) van ordenadas de menor a mayor según el grado de cercanía con respecto de los Atributos (variables exógenas). Los FM con $Y_j < Y_{j+1}$ influyen en la definición de otros FM, los cuales se explican por los Atributos relacionados y la influencia de los FM de los que ellos dependen.

El efecto de los Atributos con respecto de los FM se indica por λ_{ji} , esta es la Carga Factorial (CF). El primer subíndice corresponde al FM receptor Y_j , y el segundo subíndice corresponde al Atributo emisor X_i . Con respecto de los FM, el efecto entre ellos se muestra con β_{ji} donde el primer subíndice corresponde al FM receptor Y_j , y el segundo subíndice al emisor Y_{j-1} .

Entre los Atributos no se consideran efectos, ellos no son causados por ninguna variable de miden directamente, así que la relación que existe entre ellos se expresa por el coeficiente de

correlación. Entre ellas solo se presenta covariación, sin que se especifique la fuente de variabilidad.

Respecto de los errores, estos se pueden identificar en los Atributos y en los FM. Los errores asociados a los Atributos se representan por δ_i , donde el subíndice corresponde al Atributo X_i . De igual manera, ζ_j corresponde al error asociado con el FM Y_j . Más adelante se hará referencia a los errores y su tratamiento en esta investigación.

Por ejemplo: La ecuación estructural para el FM, CommTM, identificado como Y_1 , viene dada por:

$$Y_1 = \sum \lambda_{1i} X_i + \zeta_1$$

Donde X_i : ($X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}$), i corresponde a los Atributos que explican al FM Y_1 .

De igual manera la ecuación para el FM, LeaderSh denominado como el FM Y_2 se compone de los Atributos que lo explican y el efecto directo de Y_1 representado por β_{21} .

$$Y_2 = \sum \lambda_{2i} X_i + \beta_{21} Y_1 + \zeta_2$$

Donde X_i : ($X_{19}, X_{20}, X_{21}, X_{22}$), i corresponde a los Atributos que explican al factor Y_2 .

Para los demás FM, cada una de las ecuaciones consideran los efectos de los Atributos asociados con cada uno de ellos, el efecto directo de los FM causa y adicionalmente los efectos indirectos de los FM ubicados entre dos y seis segmentos atrás del FM endógeno que recibe el efecto. En la siguiente sección, luego de la identificación de las relaciones entre los elementos de madurez, se presentan las ecuaciones estructurales.

4.3.7 Expresión Matricial de las Ecuaciones Estructurales del Modelo

La notación para las expresiones matemáticas de las ecuaciones estructurales más utilizada es la notación LISREL⁹ y hace uso de letras griegas, las cuales se usan en minúscula para desplegar las ecuaciones y en mayúscula para denotar las matrices. En ella los constructos o variables latentes o para esta investigación Factores de Madurez (FM), en el Anexo 4.7 denominado LISREL se presentan las letras que se denotan estas ecuaciones, este es un

⁹ LISREL, es el acrónimo de Linear Structural Relations). Es un programa usado en SEM. Desarrollado en la década del 70 por Jöreskog y Dag Sörbom, (Jöreskog, 1993) profesores de la Universidad de Upsala, Suecia. Lo distribuye la empresa SSI (Scientific Software International).

documento de la Portland State University.

El SEM se compone de dos modelos, el Modelo de Medida o externo u Outer Model y el Modelo Estructural o Interno o Inner Model.

4.3.8 Modelo Estructural

El modelo estructural tiene la forma:

$$\eta = \Gamma\xi + B\eta + \zeta$$

Esta forma representa las matrices asociadas, donde:

η : (Eta) Variables latentes endógenas, FM Endógenos.

Γ : (Gamma) Se refiere a la matriz $q \times r$ de coeficientes de regresión entre variables latentes exógenas, FM exógenos, y variables latentes endógenas, FM endógenos,

ξ : (Xi o Ksi) Variables latentes exógenas, FM exógenos,

B : (Beta) Es una matriz de $q \times q$, una matriz de coeficientes de regresión entre variables latentes endógenas, FM endógenos,

ζ : (Zeta) Alteraciones, o errores debidas a las variables endógenas, FM endógenos,

La expresión matricial se desarrolla con letras minúsculas para los parámetros de estas matrices, las cuales tienen las mismas interpretaciones que las anteriores.

γ : Trayectoria causal de una variable latente exógena a una variable latente endógena,

β : Trayectoria causal entre variables latentes endógenas.

Matrices de Ecuaciones para el Modelo Estructural

$$\begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma_{11} \\ \gamma_{12} \\ \gamma_{13} \end{bmatrix} \times \xi_1 + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{21} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{31} & 0 & 0 & \beta_{34} & 0 & 0 \\ \beta_{41} & \beta_{42} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \beta_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \beta_{62} & \beta_{63} & 0 & \beta_{65} & 0 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \\ \eta_4 \\ \eta_5 \\ \eta_6 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \zeta_1 \\ \zeta_2 \\ \zeta_3 \\ \zeta_4 \\ \zeta_5 \\ \zeta_6 \end{bmatrix}$$

4.3.9 Modelo de Medida

El Modelo de Medida se compone de las variables observadas, o medidas, los Atributos, relacionadas con las variables latentes exógenas, FM exógenos, y las variables observadas, Atributos, relacionadas con las variables latentes endógenas, FM endógenos.

$$\xi = \Lambda_x \mathbf{x} + \delta$$

$$\eta = \Lambda_y \mathbf{y} + \epsilon$$

Estas formas representan las matrices para cada una de las relaciones descritas, donde:

X: El resultado de la suma de las Cargas Factoriales de multiplicadas por los Atributos x. Esto explica la variable latente exógena, FM exógeno,

Y: El resultado de la suma de las Cargas Factoriales multiplicadas por los Atributos y. Esto explica la variable latente endógena, FM endógeno,

Λ_x : (Lamda) Son cargas factoriales de las variables observadas, o medidas, Atributos. Los x que explican las variables latentes exógenas, FM exógeno, el ξ ,

Λ_y : (Lamda) Son cargas factoriales de las variables observadas, o medidas, Atributos. Los y que explican las variables latentes endógenas, FM endógeno, el η ,

ξ : (Xi o Ksi) Variables latentes exógenas, FM exógenos,

η : (Eta) Variables latentes endógenas, FM Endógenos.

δ : (Delta) Alteraciones, o errores debidas a las variables observadas o medidas x, Atributos, relacionadas con la variable latente exógena, FM exógeno,

ϵ : (Épsilon) Alteraciones, o errores debidas a las variables observadas o medidas y, Atributos, relacionadas con la variable latente endógena, FM endógeno.

Las expresiones matriciales se desarrollan con letras minúsculas para los paramentos de estas matrices, las cuales tienen las mismas interpretaciones que las anteriores.

Matrices de Ecuaciones para el Modelo de Medida FM Exógeno - CommTM

$$\xi_1 = [\lambda_{9\ 1} \quad \lambda_{10\ 1} \quad \lambda_{11\ 1} \quad \lambda_{12\ 1}] \begin{bmatrix} x_9 \\ x_{10} \\ x_{11} \\ x_{12} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \delta_9 \\ \delta_{10} \\ \delta_{11} \\ \delta_{12} \end{bmatrix}$$

Matrices de Ecuaciones para el Modelo de Medida FM Endógeno - LeaderSh

$$\eta_1 = [\lambda_{19\ 2} \quad \lambda_{20\ 2} \quad \lambda_{21\ 2} \quad \lambda_{22\ 2}] \begin{bmatrix} x_{19} \\ x_{20} \\ x_{21} \\ x_{22} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{19} \\ \epsilon_{20} \\ \epsilon_{21} \\ \epsilon_{22} \end{bmatrix}$$

Matrices de Ecuaciones para el Modelo de Medida FM Endógeno - SupporOp

$$\eta_2 = [\lambda_{1\ 3} \quad \lambda_{2\ 3} \quad \lambda_{3\ 3} \quad \lambda_{4\ 3} \quad \lambda_{5\ 3}] \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \lambda_3 \\ \lambda_4 \\ \lambda_5 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \epsilon_3 \\ \epsilon_4 \\ \epsilon_5 \end{bmatrix}$$

Matrices de Ecuaciones para el Modelo de Medida FM Endógeno - TeamWork

$$\eta_3 = [\lambda_{13\ 3} \quad \lambda_{14\ 3} \quad \lambda_{15\ 3} \quad \lambda_{16\ 3} \quad \lambda_{17\ 3} \quad \lambda_{18\ 3}] \begin{bmatrix} x_{13} \\ x_{14} \\ x_{15} \\ x_{16} \\ x_{17} \\ x_{18} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{13} \\ \epsilon_{14} \\ \epsilon_{15} \\ \epsilon_{16} \\ \epsilon_{17} \\ \epsilon_{18} \end{bmatrix}$$

Matrices de Ecuaciones para el Modelo de Medida FM Endógeno - WorkEnv

$$\eta_4 = [\lambda_{6\ 4} \quad \lambda_{7\ 4} \quad \lambda_{8\ 4}] \begin{bmatrix} x_6 \\ x_7 \\ x_8 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_6 \\ \epsilon_7 \\ \epsilon_8 \end{bmatrix}$$

Matrices de Ecuaciones para el Modelo de Medida FM Endógeno – SPImprov

$$\eta_5 = [\lambda_{23\ 5} \quad \lambda_{24\ 5} \quad \lambda_{25\ 5} \quad \lambda_{26\ 5} \quad \lambda_{27\ 5} \quad \lambda_{28\ 5} \quad \lambda_{29\ 5}] \begin{bmatrix} x_{23} \\ x_{24} \\ x_{25} \\ x_{26} \\ x_{27} \\ x_{28} \\ x_{29} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{23} \\ \epsilon_{24} \\ \epsilon_{25} \\ \epsilon_{26} \\ \epsilon_{27} \\ \epsilon_{28} \\ \epsilon_{29} \end{bmatrix}$$

Matrices de Ecuaciones para el Modelo de Medida FM Endógeno - ProImpr

$$\eta_6 = [\lambda_{30\ 6} \quad \lambda_{31\ 6} \quad \lambda_{32\ 6} \quad \lambda_{33\ 6} \quad \lambda_{34\ 6} \quad \lambda_{35\ 6}] \begin{bmatrix} x_{30} \\ x_{31} \\ x_{32} \\ x_{33} \\ x_{34} \\ x_{35} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \epsilon_{30} \\ \epsilon_{31} \\ \epsilon_{32} \\ \epsilon_{33} \\ \epsilon_{34} \\ \epsilon_{35} \end{bmatrix}$$

4.3.10 Ensamble de las Ecuaciones Estructurales en Notación LISREL

El SEM resulta de los modelos de medida y el modelo estructural, sus ecuaciones se agregan para conformar las ecuaciones del modelo, según la estructura siguiente.

Modelo de Medida

$$\xi = \Lambda_x \mathbf{x} + \delta$$

$$\eta = \Lambda_y \mathbf{y} + \epsilon$$

Modelo Estructural

$$\eta = \Gamma \xi + B \eta + \zeta$$

4.4 Puntos Clave

Los Atributos se encuentran adecuadamente correlacionados y explican el FM. SE confirma la validez de los FM con los indicadores del SEM para estas variables y se confirma la validez del SEM lo cual es el primer paso que lleva a considerar que las relaciones identificadas con este método explican el fenómeno de madurez de LC en la GPC. De igual forma podrá explicarse cualquier otro fenómeno de madurez en cualquier sector al utilizar este modelo en su condición de modelo genérico de evolución.

Anexo 4.2

Cargas Factoriales de los Atributos de Madurez que explican los Factores de Madurez

Tabla A4.2 Cargas factoriales normales de las variables observadas que explican los factores de madurez. Cargas combinadas y cargas cruzadas.

	X_i	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr	SE	Valor P
LL2	X_1	0.715	0.401	0.511	0.362	0.560	0.260	0.525	0.127	<0.001
PS2	X_2	0.768	0.511	0.414	0.344	0.394	0.328	0.465	0.144	<0.001
TW2	X_3	0.792	0.445	0.374	0.312	0.431	0.205	0.384	0.106	<0.001
TW1	X_4	0.737	0.428	0.301	0.280	0.393	0.126	0.341	0.133	<0.001
LL3	X_5	0.710	0.320	0.433	0.418	0.356	0.365	0.549	0.126	<0.001
WE1	X_6	0.453	0.738	0.459	0.480	0.520	0.338	0.448	0.111	<0.001
WE2	X_7	0.403	0.729	0.346	0.361	0.414	0.227	0.394	0.082	<0.001
WS2	X_8	0.385	0.725	0.299	0.403	0.392	0.211	0.454	0.085	<0.001
HMC1	X_9	0.507	0.397	0.828	0.571	0.477	0.369	0.619	0.102	<0.001
HMC2	X_{10}	0.502	0.448	0.832	0.612	0.417	0.472	0.674	0.091	<0.001
HMC3	X_{11}	0.456	0.429	0.718	0.390	0.607	0.287	0.499	0.092	<0.001
IBP1	X_{12}	0.168	0.235	0.616	0.652	0.130	0.659	0.479	0.083	<0.001
INN2	X_{13}	0.310	0.329	0.607	0.725	0.264	0.596	0.558	0.076	<0.001
SCLO2	X_{14}	0.418	0.445	0.562	0.813	0.260	0.579	0.659	0.075	<0.001
IBP4	X_{15}	0.474	0.576	0.520	0.773	0.339	0.420	0.535	0.096	<0.001
IBP3	X_{16}	0.150	0.270	0.478	0.727	0.067	0.674	0.507	0.082	<0.001
CIF1	X_{17}	0.309	0.429	0.555	0.833	0.220	0.609	0.607	0.077	<0.001
IBP2	X_{18}	0.426	0.520	0.640	0.652	0.343	0.299	0.519	0.101	<0.001
LDC2	X_{19}	0.509	0.425	0.386	0.181	0.773	0.234	0.429	0.100	<0.001
A1	X_{20}	0.405	0.400	0.461	0.208	0.767	0.297	0.506	0.111	<0.001
LL1	X_{21}	0.479	0.500	0.531	0.365	0.729	0.341	0.490	0.099	<0.001
A2	X_{22}	0.262	0.421	0.195	0.200	0.617	0.226	0.163	0.096	<0.001
PIM2	X_{23}	0.215	0.188	0.483	0.552	0.311	0.826	0.560	0.089	<0.001
WI4	X_{24}	0.259	0.240	0.425	0.514	0.234	0.804	0.565	0.081	<0.001
WI3	X_{25}	0.263	0.313	0.458	0.529	0.291	0.802	0.630	0.073	<0.001
FC3	X_{26}	0.280	0.251	0.491	0.587	0.226	0.780	0.561	0.084	<0.001
PIM1	X_{27}	0.173	0.280	0.445	0.512	0.277	0.756	0.529	0.082	<0.001
PIM3	X_{28}	0.359	0.352	0.498	0.463	0.468	0.704	0.526	0.120	<0.001
PIM4	X_{29}	0.271	0.245	0.348	0.547	0.197	0.601	0.472	0.091	<0.001
WPS1	X_{30}	0.359	0.306	0.599	0.632	0.261	0.587	0.767	0.085	<0.001
TU1	X_{31}	0.356	0.402	0.646	0.630	0.439	0.629	0.740	0.088	<0.001
WI1	X_{32}	0.385	0.377	0.537	0.537	0.478	0.755	0.739	0.100	<0.001
FC1	X_{33}	0.421	0.477	0.547	0.545	0.347	0.383	0.733	0.072	<0.001
PPC2	X_{34}	0.481	0.528	0.467	0.460	0.437	0.406	0.701	0.115	<0.001
FC2	X_{35}	0.654	0.490	0.515	0.463	0.438	0.423	0.685	0.127	<0.001

Anexo 4.3

Validez de la Información para los Factores de Madurez

Es importante verificar la validez de los FM del modelo para su interpretación. No se recomienda realizar el análisis sin verificar que las variables son válidas y por tanto que el modelo es válido. Tabla A4.3.1.

Tabla A4.3.1. Estadísticos del SEM. Software WarpPLS 6.0. Coeficientes de los factores.

Estadístico	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpro
R-Squared	0.539	0.469		0.890	0.311	0.522	0.706
Adj. R-Squared	0.530	0.459		0.887	0.305	0.513	0.698
Composite realib.	0.862	0.774	0.838	0.888	0.814	0.903	0.871
Cronbach's alpha	0.799	0.563	0.738	0.848	0.693	0.873	0.822
Avg. Var. Extract.	0.555	0.534	0.568	0.572	0.525	0.573	0.530
Full collin. VIF	1.975	2.402	3.305	4.103	2.358	2.737	4.298
Q-squared	0.542	0.476		0.654	0.316	0.518	0.707
Min	-5.380	-3.334	-3.652	-3.680	-3.885	-3.544	-3.902
Max	1.271	1.529	1.400	1.760	1.492	1.532	1.449
Median	0.208	0.265	0.069	0.227	0.299	0.170	0.169
Mode	1.271	0.365	1.070	0.021	0.770	-0.193	-0.328
Skewness	-2.154	-1.075	-0.940	-1.044	-1.487	-0.991	-1.353
Exc. Kurtosis	8.051	1.842	0.915	1.738	2.438	0.846	2.258
Unimodal – RS	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Unimodal – KMW	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Normal – JB	No	No	No	No	No	No	No
Normal – RJB	No	No	No	No	No	No	No

R-Cuadrada y R-Cuadrada Ajustada

La *validez predictiva* se analiza con estos dos indicadores. Ellos están presentes en los factores dependientes. Estos dos índices son paramétricos, el R-Squared no toma en cuenta el tamaño de la muestra en tanto que el Adjusted R-Squared si la toma en cuenta. La diferencia entre estos dos indicadores no debe ser mayor al 5%, pues se estaría presentando un problema respecto del tamaño de la muestra y se debería disponer de una muestra más grande. Estos valores deben ser muy cercanos. En SEM en ingeniería, a diferencia de modelos de regresión lineal que exigen un nivel de predicción de más del 75%, es aceptable que el R-Squared explique al menos el 0.2, o el 20%, esto debido a que nivel de complejidad es más grande, son muchas variables explicando a muchas otras.

De acuerdo con (Cohen, 1988 y (N Kock & Lynn, 2012)(Ned Kock, 2017) si los valores de los coeficientes de R-Squared y Adjusted R-Squared están por debajo de 0,02 sugieren efectos combinados de predictores en bloques variables latentes que son demasiado débiles para ser considerados relevantes desde un punto de vista práctico. Sin embargo para modelos en ingeniería se recomienda que este valor este por encima de 0.2 (García, 2011)(Cupani, 2012).

En este caso todos los valores de estos dos índices están por encima de 0.2 con lo que se confirma que hay suficiente validez predictiva. De igual manera, se verifica que no hay efectos combinados de predictores para todas las variables latentes en el modelo.

Confiabilidad Compuesta y Alpha de Cronbach

Estos dos indicadores evalúan la confiabilidad del instrumento de medición y se deben analizar de manera conjunta. La confiabilidad es una medida de la calidad de un instrumento de medición. Puede decirse que el instrumento de medición tiene una buena confiabilidad si las preguntas se entienden de la misma manera por diferentes encuestados. Se aplican solo a las variables latentes.

El Alpha de Cronbach mide la *validez interna* para así confirmar cuales de las variables agrupadas deberían estar en el factor. Este indicador usa las varianzas sin estandarizar y si

hay diferentes variables con diferentes escalas, hay problemas con la calidad del índice. De otra parte, el Composite Reliability (También llamado el Cronbach Estandarizado) mide exactamente lo mismo, pero con valores estandarizados. Los indicadores de Composite reliability y Alpha Cronbach deberían ser iguales o superiores a 0,7 (Fornell y Larcker, 1981; Nunnally, 1978; Nunnally y Bernstein, 1994; Kock, 2014a; Kock y Lynn, 2012) y si estos índices se acercan a 1.0 es mejor. Sin embargo, la versión más relajada de este criterio utilizada ampliamente, considera que uno de los dos coeficientes debe ser igual o mayor que 0,7 (N Kock & Lynn, 2012). Lo que generalmente se aplica al Composite Reliability, que suele ser el más alto de los dos (Fornell y Larcker, 1981; Kock y Lynn, 2012).

Como se puede confirmar en la Tabla A4.3.1, los dos indicadores cumplen con el valor por encima de 0.7, con excepción del Alpha Cronbach para WorkEnv 0.563, sin embargo, al considerar la versión relajada, el Composite Reliability es de 0.774, lo que sugiere esta y todas las variables latentes cuentan con validez interna.

Varianza Promedio Extraída, AVE

Se utiliza para la medir la validez discriminante (o validez divergente) y la validez convergente. Es una forma de medir si las variables observadas están bien valoradas. La validez discriminante es un criterio utilizado para evaluar las escalas de medida de estos FAM. “La validez discriminante prueba que los constructos que no deberían tener ninguna relación, de hecho, no la tienen, en tanto que la validez convergente prueba que los constructos que se espera que estén relacionados, lo estén. Para la evaluación de validez convergente es aceptable el 0.5” (Fornell & Larcker, 1981; Kock y Lynn, 2012), y se aplica solo a los Atributos en condición de variable reflectiva.

Como se ve en la tabla estos valores para todas las variables latentes están por encima de 0.5, lo que muestra que las variables observadas están adecuadamente valoradas.

Correlaciones entre Factores y Errores

Esta correlación se utiliza para conocer que tanto un factor puede explicar a otro. En esta tabla se identifican. Para esto se hace uso de la matriz de correlaciones, en la cual la diagonal está conformada por las raíces cuadradas de las varianzas promedio de cada factor. En la Tabla A4.31, se muestran los AVE para cada factor, los cuales corresponden a cada uno de los valores de la diagonal de la matriz mostrada en la Tabla A4.3.2, elevados al cuadrado respectivamente. Por ejemplo: El AVE de CommTM = 0.568 corresponde a $\sqrt{0.568} = 0.754$, valor ubicado en la posición de CommTM. Confirmando así, que el instrumento de valoración cuenta con buena validez discriminante y que las preguntas respecto de la importancia del atributo en la madurez de LC fueron entendidas por los encuestados.

El criterio de aceptación fue evaluado en el aparte anterior, sin embargo, hay otro criterio que debe ser revisado para cada FM. Se trata que cada valor en la diagonal debe ser mayor que cualquiera de las correlaciones que involucran ese FM (Fornell y Larcker, 1981; Kock, 2015c; (N Kock & Lynn, 2012) En el modelo, para el valor correspondiente a Compromiso de la Alta Gerencia (CommTM) está mostrando que existe otro valor más alto en la columna y la fila cruzadas con su ubicación correspondiente a Mejoramiento de la Producción (ProImpr). Esto hace sospechar de un atributo colineal.

Se debe ir a la Tabla A4.3.2 de Cargas combinadas y cargas cruzadas para identificar con ayuda del FA el Atributo que presenta problemas. Un atributo candidato a eliminarse es aquel que cuente con una carga factorial más alta en otro de los factores diferentes a aquel donde está ubicado.

El atributo del que se sospechó colinealidad está completamente identificado y es IBP1, con respecto del cual se decidió dejar en el factor Compromiso de la Alta Gerencia (CommTM) después de demostrar que en este factor aporta más a la robustez del modelo y por tanto esa es la localización correcta para la identificación de la madurez de LC en la GPC.

Tabla A4.3.2. Correlación entre los FM con la raíz cuadrada de los AVE. El Valor P de todas estas correlaciones es $P < 0.001$ sin excepción.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork	(0.745)	0.566	0.546	0.461	0.573	0.345	0.608
WorkEnv	0.566	(0.730)	0.504	0.568	0.605	0.355	0.591
CommTM	0.546	0.504	(0.754)	0.743	0.545	0.597	0.758
SupporOp	0.461	0.568	0.743	(0.756)	0.330	0.703	0.749
LeaderSh	0.573	0.605	0.545	0.330	(0.724)	0.380	0.550
SPImprov	0.345	0.355	0.597	0.703	0.380	(0.757)	0.729
ProImpr	0.608	0.591	0.758	0.749	0.550	0.729	(0.728)

De manera complementaria se debe revisar los VIF ubicados en la diagonal de la Tabla 3. Los VIF en la diagonal deben ser iguales o menores que 3.3. Con lo cual se garantiza que no hay problemas de colinealidad (N Kock & Lynn, 2012) ni existen factores de confusión, no se presentan problemas de causalidad.

En la Tabla A4.3.3 se muestran las correlaciones entre los términos de error del factor asociados con los términos de error en la diagonal. Con esta tabla se pueden identificar términos de error altamente correlacionados, que sugieren la existencia de factores de confusión.

Tabla A4.3.3. Correlación entre los términos de error de la variable latente y los VIF.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork	(1.056)	-0.086	0.031	0.044	-0.166	-0.080	(1.056)
WorkEnv	-0.086	(1.076)	0.015	-0.079	-0.219	0.026	-0.086
CommTM	0.031	0.015	(1.036)	-0.045	0.065	-0.168	0.031
SupporOp	0.044	-0.079	-0.045	(1.052)	0.002	0.199	0.044
LeaderSh	-0.166	-0.219	0.065	0.002	(1.096)	-0.007	-0.166
SPImprov	-0.080	0.026	-0.168	0.199	-0.007	(1.079)	-0.080
ProImpr	(1.056)	-0.086	0.031	0.044	-0.166	-0.080	(1.056)

Colinealidad Completa, VIF

El índice de inflación de la varianza permite la identificación de la colinealidad vertical y lateral, o la multi-colinealidad. Involucra a todas las variables latentes en un modelo, es una condición que hay al interior de las variables latentes. “Los VIF de colinealidad completa que sean menores o iguales a 3.3 sugieren la multi-colinealidad completa en el modelo y ningún sesgo de método común” (Kock, 2015c; (N Kock & Lynn, 2012) Un criterio relajado sugiere que los VIF pueden ser menores o iguales a 5 (Hair et al., 1987; 2009; (Kline, 2011) (Hair, Anderson, Tatham, & Black, 1995) Kock, 2014a). Aunque se dispone de un criterio aún más relajado y permite que sean inferiores a 10 (Hair et al., 1987; 2009; Kline, 1998; Kock, 2014a).

Es recomendable que, para obtener una FM, éste se conforme por un grupo 7 ± 2 Atributos. Se debe evitar definir un FM por un solo Atributo. Se recomienda contar con un grupo entre 5 y 9 Atributos, pues en la medida en que el FM se define por 9 o más Atributos se amplía la posibilidad de tener más variables colineales.

Este modelo cuenta con VIF que varían entre 1.975 y 4.298 ver Tabla A4.3.1, los cuales se encuentran en los rangos aceptables para los FM según el criterio de aceptación. Las variables SupporOp con 4.103 y ProImpr con 4.298 se analizan con el criterio relajado ≤ 5 .

En el WarpPLS es posible identificar las variables que están presentando colinealidad. Se usa la opción “Indicator Weights” que despliega una tabla en la cual se identifican los Atributos asociados a cada FM. En la columna VIF de cada Atributo se escoge aquel que cuente con el valor más alto. Esta es la candidata para eliminar por sospecha de colinealidad. Entonces se procede a retirarla del FM y se corre el modelo. El VIF asociado debería mejorar.

Sin embargo, para mejorar este indicador en el modelo se podrían eliminar algunos Atributos que contengan información repetida (se pregunta lo mismo con diferente texto). Este no es el caso en este estudio, pues los Atributos están preguntando cosas diferentes. De otra parte, al revisar la correlación entre los Atributos, como se puede confirmar en la matriz de correlaciones, se verifica que ninguna cuenta un valor de correlación cercano a 0.9. Los Atributos con alta colinealidad se pueden identificar en la matriz de correlaciones de tal

manera que una correlación mayor a 0.9 indica un alto nivel de colinealidad y este criterio puede usarse para eliminar uno de los Atributos en cuestión.

Para el SEM de LC en la GPC, se decidió avanzar con el criterio relajado y aceptar valores ≤ 5 para este indicador.

Factores de Inflación de Varianza de Bloque

Este indicador se obtiene para cada FM que tienen dos o más predictores en un bloque de FM. Este indicador no se calcula para FM con un predictor o sin predictor. Cada VIF se asocia con uno de los dos o más predictores y se relaciona con el vínculo entre ese predictor y su FM. Si un FM del predictor apunta a dos o más FM diferentes en el modelo, ese FM tiene múltiples criterios asociados con ella. Tabla A4.3.4

Tabla A.4.3.4 Factores de Inflación de la Varianza de Bloque

	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	1.410	1.410					
WorkEnv		1.541	1.541				
SupporOp	1.651	2.082		1.965			
SPImprov		1.151			1.151		
ProImpr			1.426		2.257	2.244	

Este indicador es la medida del nivel de colinealidad "vertical" (N Kock & Lynn, 2012), o redundancia, entre los factores que tienen la hipótesis de afectar a otro factor. Los VIF de bloque deben estar por debajo de 3.3. “Este tipo clásico de colinealidad se refiere a la colinealidad predictora - predictiva en un bloque variable latente que contiene uno o más predictores variables latentes y un criterio de variable latente” (Ned Kock, 2017).

El Coeficiente Q-Cuadrado

Es una medida no paramétrica, es una prueba de validez predictiva o relevancia, no paramétrica. No tiene en cuenta el tamaño de la muestra. Es una prueba asociada a cada bloque de FM en el modelo, a través del FM endógeno que es la variable de criterio en el bloque (Kock, 2015d; Kock & Gaskins, 2014). Este indicador es aceptable en relación con un FM endógena con un coeficiente mayor que cero.

Si llegase a suceder que Q-Squared sea menor que cero, es un indicativo que el sentido de la relación está mal propuesta. En el modelo, todos los valores Q-Squared están por encima de 0.316 que es mayor a cero, lo que hace que este indicador sea aceptado como un buen desempeño del modelo.

Asimetría / Kurtosis

Las distribuciones de los FM son unimodales y no son normales. Estas pruebas se aplican a los FM, que son combinaciones de Atributos y errores de medición. Los resultados de estas pruebas se pueden ver como resultados de pruebas de normalidad y multimodalidad "multivariantes" lo cual se debe al uso de los algoritmos que permiten la utilización del modelo lineal. Para determinar la normalidad univariada, se examina la distribución de cada FM y analizar los índices de Asimetría (Skewness) y Kurtosis.

Los valores de asimetría deben ser inferiores a 3, los cuales se confirman para todos los FM del modelo y el índice de Kurtosis o Kurtosis con valores inferiores a 10 (Kline, 2011). El índice de Kurtosis en la Tabla 1, presenta un valor máximo de 8.051 para el FM TeamWork, sin embargo, es inferior a 10, Por lo que se valida este índice con el criterio más relajado. A continuación, las figuras para cada uno de los FM. Ver Figuras A4.3.1-A4.3.7.

Figura A4.3.1. Histograma para CommTM. Asimetría -0.940 y Kurtosis 0.915

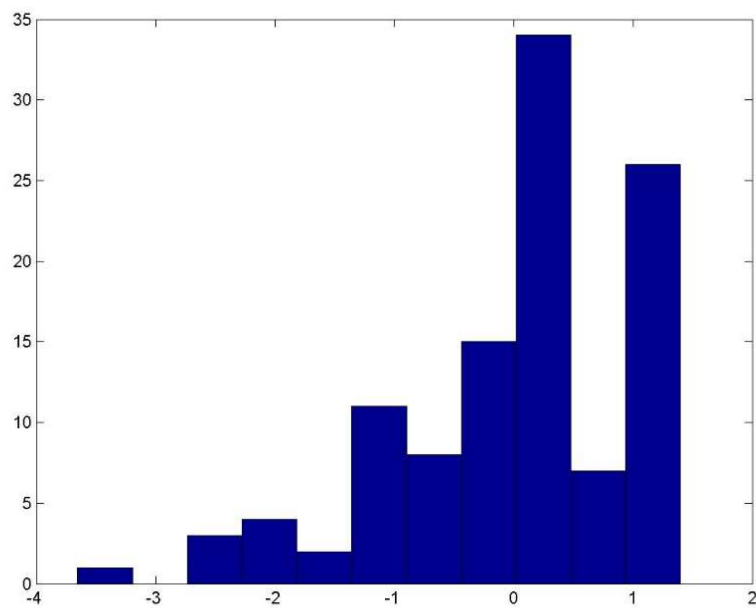


Figura A4.3.2. Histograma para LeaderSh. Asimetría -1.487 y Kurtosis 2.438

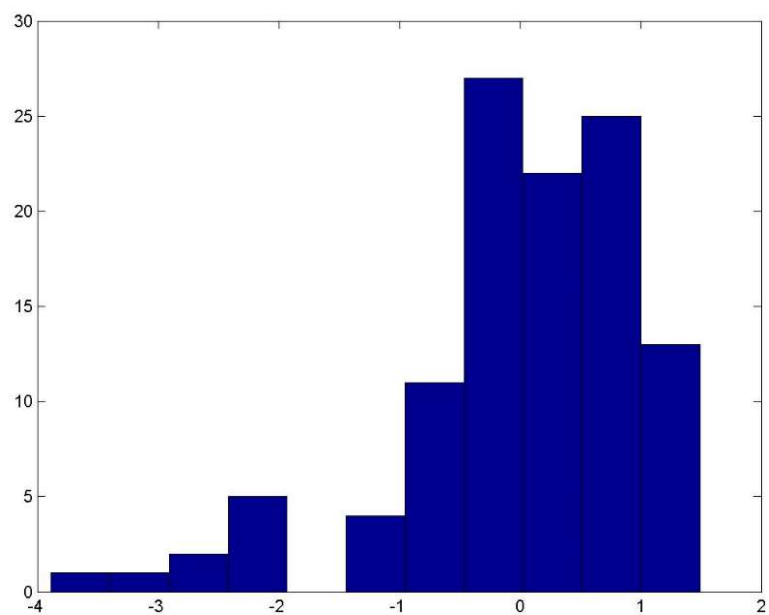


Figura A4.3.3. Histograma para TeamWork. Asimetría -2.154 y Kurtosis 8.051

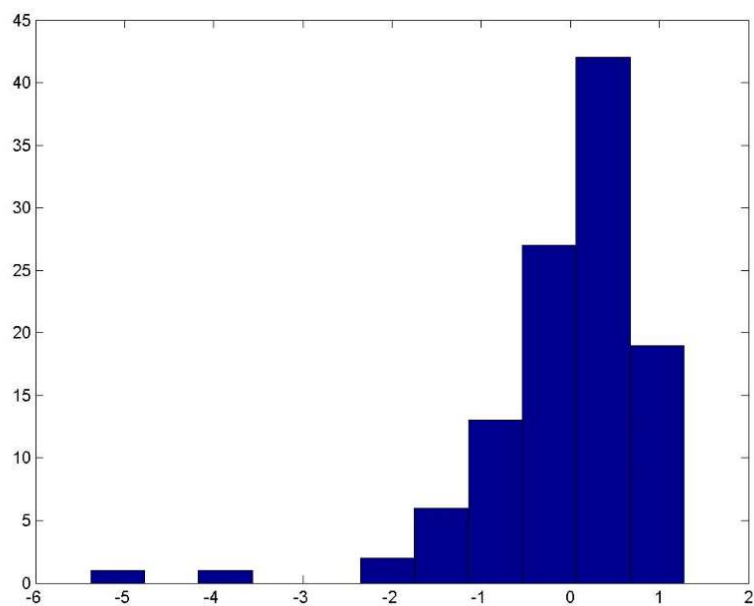


Figura A4.3.4. Histograma para WorkEnv. Asimetría -1.075 y Kurtosis 1.842

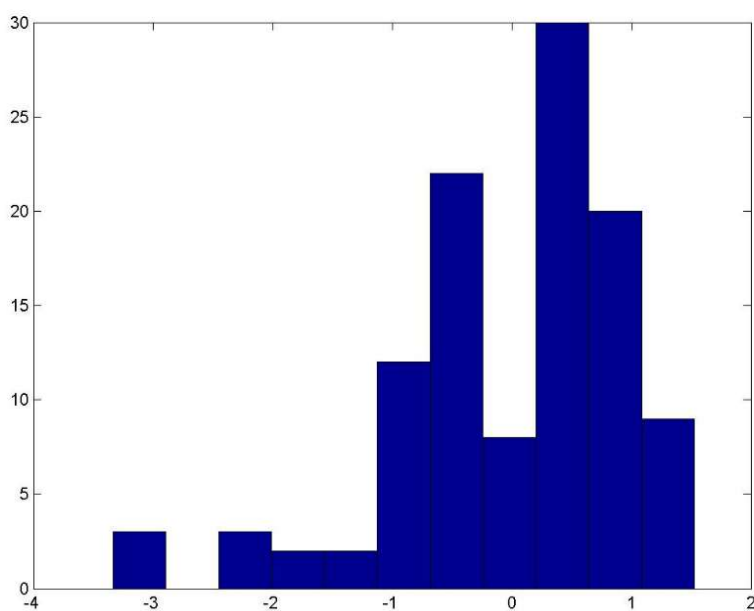


Figura A4.3.5. Histograma para SupporOp. Asimetría -1.044 y Kurtosis 1.738

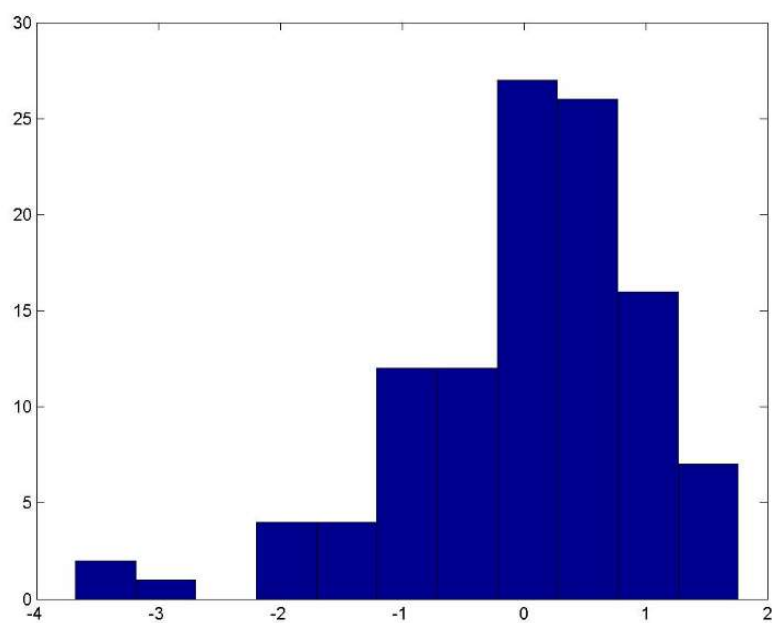


Figura A4.3.6. Histograma para SPIImprov. Asimetría -0.991 y Kurtosis 0.846

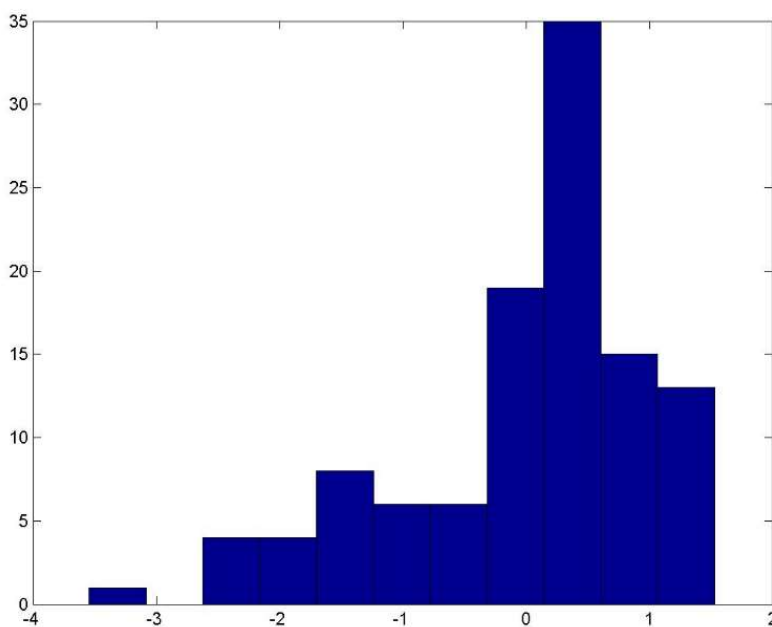
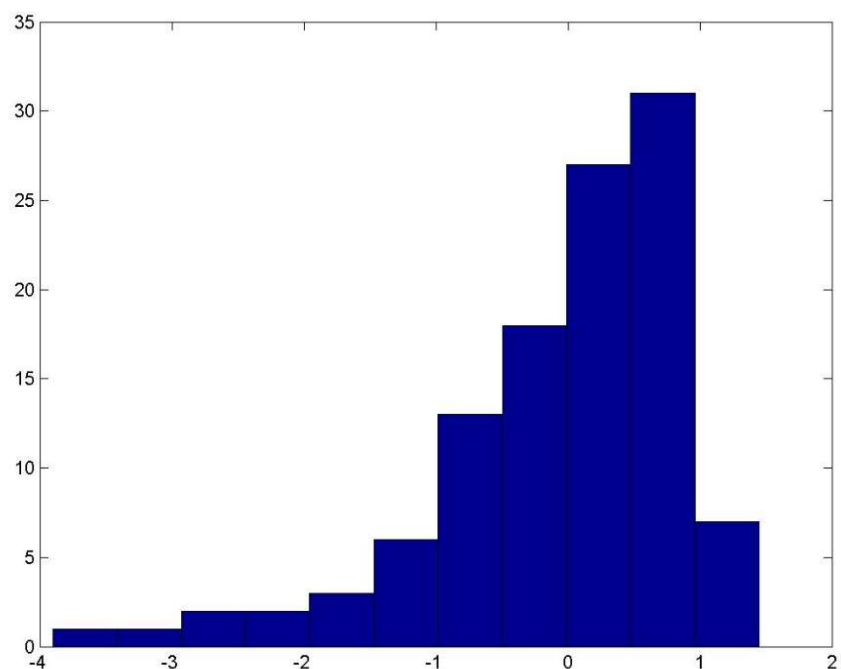


Figura A4.3.7. Histograma para ProImpr. Asimetría -1.353 y Kurtosis 2.258



Relaciones entre los Factores de Madurez

Es importante estudiar las relaciones entre los FM, esto se puede realizar gráficamente. Se seleccionan valores estandarizados. En la Tabla A4.3.5, se presentan el tipo de relaciones del modelo. Todas las relaciones entre FM corresponden a relaciones deformadas o no lineales, no hay relaciones lineales.

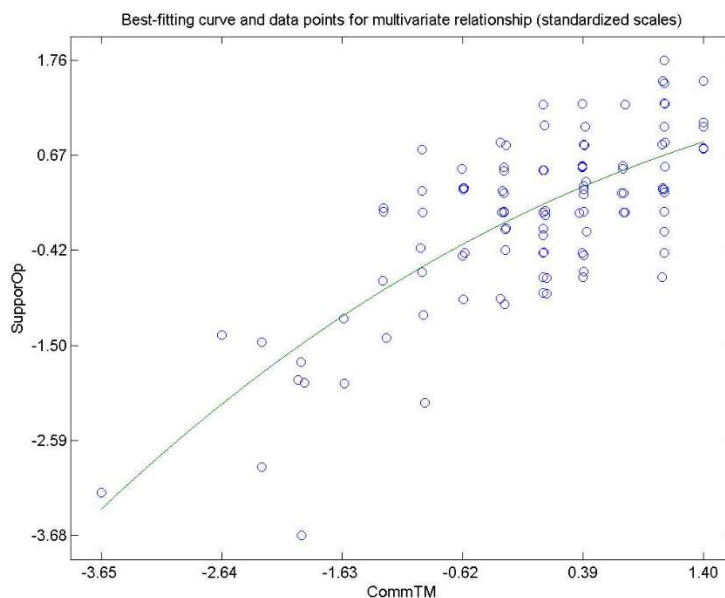
Tabla A4.3.5. Tipos de relaciones en el modelo.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpro
TeamWork			Warped		Warped		
WorkEnv	Warped				Warped		
CommTM							
SupporOp		Warped	Warped		Warped		
LeaderSh			Warped				
SPImprov				Warped	Warped		
ProImpro	Warped			Warped		Warped	

Relación entre el FM Compromiso de la Alta Gerencia (CommTM) y Soporte Operativo (SupporOp)

Esta es la relación con el β mayor en el modelo. La curva es cóncava, una curva u, y se mueve entre -3.6 desviaciones estándar hasta 1.4 desviaciones estándar. Esta relación muestra un crecimiento ascendente donde los datos se recargan hacia la derecha. Figura A4.3.8. En la medida en que CommTM aumenta, el efecto en el FM SupporOp también aumenta de manera sostenida, la influencia del primer factor en el segundo es grande.

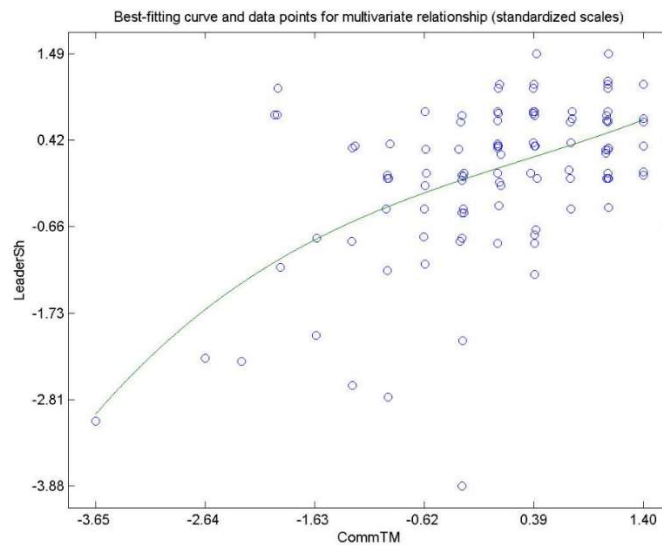
Figura A4.3.8. Relación entre las variables CommTm Vs SupportOp



Relación entre el FM Compromiso de la Alta Gerencia (CommTM) y Liderazgo Lean (Lean Leader)

Es una curva u y un tramo recto y se mueve entre - 3.6 desviaciones estándar hasta 1.4 desviaciones estándar. Esta relación muestra la influencia directa de CommTm en LeaderSh. Figura A4.3.9

Figura A4.3.9. Relación entre las variables CommTm Vs SupportOp



Anexo 4.4

4.4 Índices de Ajuste y Calidad del Modelo

La calidad del modelo, conformado por los factores y sus relaciones, se identifica con ayuda de un grupo de indicadores, con los cuales se conoce su nivel de ajuste a los datos obtenidos de los expertos. Estos son 10 indicadores generales del desempeño del modelo los cuales se analizan más adelante. Es importante para la explicación de los indicadores generales, abordar primero la explicación del Valor P.

4.4.1 Valor P

El Valor P es la probabilidad bajo un modelo estadístico específico, de que un resumen estadístico de los datos sea igual o más extremo que su valor observado (Wasserstein & Lazar, 2016). Corresponde a la probabilidad que el estadístico sea posible bajo la hipótesis nula, si cumple con la condición de ser menor al nivel de significancia impuesto arbitrariamente, entonces la hipótesis nula será, eventualmente, rechazada.

“Un valor P proporciona un enfoque para resumir la incompatibilidad entre un conjunto particular de datos y un modelo propuesto para los datos. El contexto más común es un modelo, construido bajo un conjunto de supuestos, junto con una llamada "hipótesis nula". A menudo, la hipótesis nula postula la ausencia de un efecto, como la ausencia de diferencia entre dos grupos, o la ausencia de una relación entre un factor y un resultado. Cuanto menor es el valor de **P**, mayor es la incompatibilidad estadística de los datos con la hipótesis nula, si se cumplen los supuestos subyacentes utilizados para calcular el valor de **P**. Esta incompatibilidad se puede interpretar como que pone en duda o proporciona evidencia contra la hipótesis nula o las suposiciones subyacentes”(Wasserstein & Lazar, 2016).

El SEM sugiere que aquellos Valores $P > 0.05$ deben ser descartados, sin embargo, para Valores P entre 0.001 y 0.05 se puede decidir si la relación se tiene en cuenta para el estudio. Para valores superiores a 0.001 la decisión de mantener la relación obedece a la identificación de su importancia a partir de la conversación de la investigadora con algunos expertos en la etapa de entrevistas de manera complementaria a que la relación cumple con el criterio de Valor $P < 0.05$.

Esto quiere decir que el nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, y por lo tanto el nivel de confianza es $1 - \alpha = 0.95$, por tanto, para este estudio, cualquier Valor P menor que $\alpha = 0.05$ es significativo para el análisis de las relaciones en el modelo.

4.4.2 Prueba de hipótesis

Respecto de la prueba de hipótesis, esta es la consideración general para todas las relaciones del modelo estructural es la siguiente:

La Hipótesis Nula es,

$$H_0: \beta_i = 0, \text{ No existe una relación directa entre las variables latentes}$$

Y la Hipótesis Alterna es,

$$H_i: \beta_i \neq 0, \text{ Existe una relación directa entre las variables latentes}$$

Para realizar la prueba de hipótesis, se calcula el valor de z. Se requiere el calor de la media poblacional y la media muestral, la desviación estándar y el tamaño de la muestra.

$$z = (x - \mu) / (\sigma / \sqrt{n})$$

Al obtener el valor de z, se busca en la Tabla de Probabilidades de la Distribución Normal Estándar y se encuentra lee el Valor P. Este Valor P se compara con el nivel de significancia α definido, que para este caso es $\alpha = 0.05$, y al comparar, se acepta o rechaza la hipótesis nula.

Con Valores P menores de 0.05, NO se acepta la hipótesis nula, por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna: “Existe una relación directa y positiva entre las variables latentes”.

4.4.3 Intervalo de Confianza

Para identificar los intervalos de confianza para cada uno de los parámetros de las relaciones entre factores del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Límites del intervalo} = \beta_i \pm Z * \delta$$

Donde, δ es el error relacionado con la medición y se calcula con la expresión $\delta = (\sigma / \sqrt{n})$

Para nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, se el área de la distribución sin uno de los lados de la cola, $1 - \alpha/2 = 0.975$, se busca Tabla de Probabilidades de la Distribución Normal Estándar valor de Z, el $Z_{\alpha/2}$ correspondiente es de $Z_{\alpha/2}$ que es igual a 1.96.

El Límite inferior del intervalo es:

$$LI = \beta_i - 1.96 * \delta$$

El Límite superior del intervalo es:

$$LS = \beta_i + 1.96 * \delta$$

Si el intervalo de confianza incluye el cero, se tiene la certeza que la β_i no es significativa.

4.4.4 APC, ARS y AARS

El APC es el promedio de los valores absolutos de los coeficientes de las relaciones entre variables latentes. El ARS es el promedio de las R-Squared y el AARS es el promedio del R-Squared ajustado, este siempre es más bajo que el ARS debido al ajuste (Theil, 1958; Wooldridge, 1991).

En la medida en que se agreguen variables latentes al modelo, el APC disminuye y el ARS aumenta, estos indicadores se compensan entre sí (Kock, 2010; 2011c). De otra parte, se puede buscar un aumento en estos indicadores si las variables que se integran mejoran la calidad de predicción y explicación del modelo, sin embargo, el modelo cuenta con las variables justas resultado de la validación racional aplicada a este estudio.

Los Valores P para estos indicadores son menores que 0.001 lo cual muestra que estos indicadores son significativos.

4.4.5 VIF y AFVIF

El VIF y el AFVIF miden la multi-colinealidad completa. En el SEM, los valores son respectivamente 1.481 y 2.998 los cuales son inferiores a 3.3, mostrando que los factores están midiendo diferentes constructos, no hay colinealidad entre ellos.

4.4.6 GoF - (Tenenhaus GoF)

El poder explicativo del modelo de 0.522 está por encima del recomendado de 0.36. Esto es que el modelo explica ampliamente el fenómeno de madurez con lo cual se puede hacer uso de él para desarrollar los artefactos que componen el modelo de evolución. Este índice también recibe el nombre de índice de comunalidad para un factor, sin embargo, aquí se calcula para el modelo como la suma

de las cargas cuadradas del factor, cada carga asociada con un indicador, dividida por el número de indicadores.

4.4.7 SPR

Este indicador mide el grado en que el modelo está libre de las instancias paradójicas de Simpson (Kock, 2015e; Kock & Gaskins, 2016; Pearl, 2009; Wagner, 1982). El SPR es 1.000, lo que significa que el 100% de las rutas en un modelo están libres de la paradoja de Simpson. Por lo tanto no hay coeficientes de ruta y relaciones con signos diferentes. Por lo que las rutas del modelo son correctas.

4.4.8 El índice RSCR

Cuando una variable latente predictor realiza una contribución negativa a la R^2 de una variable latente de criterio, esto significa que el predictor está realmente reduciendo el porcentaje de varianza explicado en el criterio. Tal reducción toma en consideración las contribuciones de todos los predictores más la del residual. Este índice es similar al SPR. La diferencia clave es que se calcula en base a los valores reales de las contribuciones R-cuadrado, no en el número de rutas donde estas contribuciones tienen signos específicos.

El RSCR se calcula dividiendo la suma de las contribuciones R-Squared positivas en un modelo por la suma de las contribuciones R^2 absolutas (ya sean negativas o positivas). Para este modelo el valor de 1.000 significa que la suma de las contribuciones R^2 positivas en un modelo constituye el 100% de la suma total de las contribuciones absolutas de R^2 en el modelo y no hay presencia de contribuciones de R^2 negativas.

4.4.9 El índice SSR

El valor de SSR es igual a 1.0 lo que significa que el 100% de las rutas en un modelo están libres de supresión estadística (Kock & Gaskins, 2016; MacKinnon et al., 2000). Esto significa que los coeficientes de ruta son menores, en términos absolutos, que la correlación asociada al par de factores. No hay problemas de causalidad, las relaciones de causalidad son correctas.

4.4.10 El NLBCDR

“El índice NLBCDR es una medida del grado en que los coeficientes de asociación bivariados no lineales proporcionan respaldo para las direcciones hipotéticas de los enlaces causales en un modelo” (Kock, 2017).

El valor del NLBCDR es 1.0, lo que significa que el 100% de las instancias relacionadas con la ruta en un modelo, el soporte para la dirección hipotética de causalidad invertida es débil.

Sobre el ajuste del modelo

En general, con relación a los indicadores analizados puede afirmarse que el SEM está ajustado y ofrece información confiable para el uso del modelo. De esta manera se puede decir que el modelo permite identificar las relaciones entre las variables relacionadas con la madurez de LC en la GPC y a partir de este modelo construir un índice que permita conocer con ayuda de un modelo de calificación de los atributos de madurez de manera individual, el nivel de madurez de los factores de manera local y del modelo en general.

4.4.11 Re-especificación del modelo

A partir del modelo empírico se revisaron diferentes configuraciones de relaciones en el modelo para buscar el mejor ajuste posible. Las variables latentes son independientes y mutuamente excluyentes (no tan colineales), entre ellas se mide el concepto general de interés, en este caso la madurez, esto hace más robusto el modelo.

Anexo 4.5

Relaciones directas e indirectas entre los factores de madurez

4.5.1 Relaciones directas entre los factores de madurez

Una de las características más valiosas del SEM es la capacidad de identificar las relaciones entre las variables latentes que lo componen, para esta investigación los factores de madurez (FM). Estas relaciones muestran los efectos directos e indirectos que uno o más FM tiene sobre otro u otros por diferentes rutas y diferente cantidad de segmentos en cada ruta.

Los efectos directos son los más importantes ya que representan las regresiones entre los FM, sin embargo, se pueden presentar efectos indirectos tanto o más importantes que los indirectos. De igual manera se puede identificar el tamaño de esos efectos, esta magnitud permite precisar la influencia de los FM de quienes se recibe el efecto.

4.5.2 Relaciones directas

Las relaciones que se confirman con el SEM corresponden a relaciones de causalidad, las cuales para los efectos directos corresponden a los coeficientes de ruta (CR). Estos CR se identifican con la letra griega β , y corresponden a los factores de regresión entre los FM. Un coeficiente positivo representa una relación directa positiva, en términos generales, por cada unidad de cambio en el FM de origen implica una β unidad de cambio en el FM de llegada. El FM de origen es llamado Predictor o Regresor y el FM de llegada se denomina Criterio. De otra parte, un coeficiente negativo representa una relación inversa, por cada unidad de cambio del FM de origen implica una β unidad de cambio inversa en el FM de llegada o criterio.

Para esta investigación, se confirma que las relaciones de causalidad entre los FM del modelo en todos los casos son positivas, ver Tabla 1, representadas por los β , lo que confirma relaciones directas y positivas entre ellos. Esta tabla se lee así:

- En el cruce de las columnas con las filas se leen los coeficientes β que indican el efecto de las relaciones directas entre los FM. El FM independiente está ubicado en la columna

y el FM dependiente está ubicado en la fila. La cantidad de β en la columna del FM independiente corresponde a la “fuerza” con que este factor influye en el FM dependiente.

- De igual manera se pueden identificar más de un coeficiente β , uno por cada FM dependiente en el que el FM independiente influye. En la fila se ubican los factores dependientes. La cantidad de β_{ji} ubicados en la fila corresponde a el número de FM independientes que influyen es el FM que nombra la fila.
- Los CR β_{ji} , son los coeficientes con los que se construyen las ecuaciones estructurales.

De otra parte, el software dispone de información para verificar las pruebas de hipótesis. Para ejemplificar el análisis de esta prueba se presenta a continuación la que corresponde a la relación directa entre Compromiso de la Alta Dirección - CommTM. Se verifica que todas las relaciones directas en esta investigación son válidas.

A continuación, en la Tabla A4.5.1 se presentan las relaciones directas entre los FM. En este aparte se explican las relaciones directas para Alta Dirección – CommTM. Para las otras relaciones directas pueden ser consultadas en el Anexo A4.5 y sus ecuaciones se resumen aquí.

Tabla A4.5.1. Coeficientes de Ruta β_{ji} . Efecto Directo.

Coeficientes de ruta β_{ji}. Efecto directo							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0.558						
TeamWork	0.506	0.324					
WorkEnv		0.468	0.295				
SupporOp	0.726	0.322		0.390			
SPImprov		0.159			0.650		
ProImpr			0.272		0.387	0.323	

Influencia del Compromiso de la Alta Dirección - CommTM (Y1)

CommTM tiene relación directa con tres factores. Los procesos de apoyo son más dependientes de las políticas, estrategias y direccionamiento de la Alta Dirección, situación que verifica en el Proceso de Producción de Proyectos de Construcción y en general el Proceso de Producción en cualquier sector.

El Compromiso de la Alta Dirección tiene una relación directa y positiva sobre Liderazgo Lean, y a través de éste, influye indirectamente en cuatro de los FM que representan el 57.14% de los factores del modelo, estas relaciones también revisten de importancia en la evaluación de la madurez de LC como se verá más adelante. En la Tabla A4.5.2 se presentan las relaciones de este FM con los tres mencionados y la ecuación de la relación directa respectiva. A continuación, se explica, a manera de ejemplo, para los otros FM la forma en que se calculan los intervalos de confianza para **CommTM (Y₁) a TeamWork (Y₃)**.

Tabla A4.5.2. Relación Directa del FM Compromiso de la Alta Dirección y los FM que impacta.

Influencia del Compromiso de la Alta Dirección - CommTM (Y ₁)		
CommTM (Y₁) a TeamWork (Y₃)	$Y_{31} = \beta_{31} Y_1$	$Y_{31} = 0.506 Y_1$
CommTM (Y₁) a LeaderSh (Y₂)	$Y_{21} = \beta_{21} Y_1$	$Y_{21} = 0.558 Y_1$
CommTM (Y₁) a SupporOp (Y₅)	$Y_{51} = \beta_{51} Y_1$	$Y_{51} = 0.726 Y_1$

CommTM (Y₁) a TeamWork (Y₃)

Este efecto se presenta por una ruta de un segmento, relación directa. Por cada unidad de cambio en CommTM se produce un cambio directo y positivo de 0.506 en TeamWork.

$$Y_{31} = \beta_{31} Y_1 \quad (9)$$

El error estándar permite construir los intervalos de confianza. Estos errores, se pueden ver en la Tabla A4.5.3 se muestran los errores para los coeficientes de ruta de las relaciones directas. Para identificar los intervalos de confianza para cada uno de los β_{ji} de las relaciones entre factores del modelo, se utiliza la siguiente expresión:

$$\text{Límites del intervalo} = \beta_{ji} \pm Z * \delta$$

Donde, δ es el error relacionado con la medición y se calcula con la expresión $\delta = (\sigma / \sqrt{n})$

Para nivel de significancia es $\alpha = 0.05$, el área de la distribución sin uno de los lados de la cola, $1 - \alpha/2 = 0.975$, se busca Tabla de Probabilidades de la Distribución Normal Estándar valor de Z, el $Z_{\alpha/2}$ correspondiente es igual a 1.96.

El Límite superior del intervalo es: $LS = \beta_{ji} + 1.96 * \delta$

El Límite inferior del intervalo es: $LI = \beta_{ji} - 1.96 * \delta$

El error para la relación CommTM y TeamWork es $\delta = 0.17$, el intervalo de confianza es:

$$LS = 0.506 + 1.96 * 0.170 = 0.839$$

$$LI = 0.506 - 1.96 * 0.17 = 0.173$$

Entonces $0.173 \leq \beta_{31} \leq 0.839$

Tabla A4.5.3. Errores Estándar para los Coeficientes β_{ji} del Modelo Estructural.

Errores estándar para los coeficientes β_{ji} del modelo estructural							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0.086						
TeamWork	0.170	0.113					
WorkEnv		0.087	0.102				
SupporOp	0.076	0.130		0.102			
SPImprov		0.064			0.062		
ProImpr			0.084		0.114	0.081	

1.1.1 Influencia del Liderazgo Lean - LeaderSh (Y2)

El Liderazgo Lean (LeaderSh) tiene una relación directa con cuatro factores. TeamWork, WorkEnv, SupporOp y SPImprov. El Liderazgo Lean es el factor que despliega los Atributos de la Alta Dirección directamente en los factores que mueven la producción en la conformación de los equipos de trabajo y la creación y desarrollo de un ambiente de trabajo, en el desarrollo de los procesos que soportan la producción y la mejora del sistema de producción. Tabla A4.5.4.

Tabla A4.5.4. Relación Directa del FM Liderazgo Lean y los FM que Impacta

Influencia del Liderazgo Lean - LeaderSh (Y ₂)		
LeaderSh (Y ₂) a TeamWork (Y ₃)	$Y_{32} = \beta_{32} Y_2$	$Y_{32} = 0.324 Y_2$
LeaderSh (Y ₂) a WorkEnv (Y ₄)	$Y_{42} = \beta_{42} Y_2$	$Y_{42} = 0.468 Y_2$
LeaderSh (Y ₂) a SupporOp (Y ₅)	$Y_{52} = \beta_{52} Y_2$	$Y_{52} = 0.322 Y_2$
LeaderSh (Y ₂) a SPImprov (Y ₆)	$Y_{62} = \beta_{62} Y_2$	$Y_{62} = 0.159 Y_2$

1.1.2 Influencia del Trabajo en Equipo - TeamWork (Y3)

El Equipo de Trabajo (TeamWork) tiene una relación directa con dos factores. Con WorkEnv y ProImpr. Tabla A4.5.5.

Tabla A4.5.5. Relación Directa del FM Trabajo en Equipo y los FM que Impacta

Influencia del Trabajo en Equipo - TeamWork (Y3)		
TeamWork (Y3) a WorkEnv (Y4)	$Y_{43} = \beta_{43} Y_3$	$Y_{43} = 0.295 Y_3$
TeamWork (Y3) a ProImpr (Y7)	$Y_{73} = \beta_{73} Y_3$	$Y_{73} = \beta_{0.272} Y_3$

1.1.3 Influencia del Ambiente de Trabajo - WorkEnv (Y4)

Un adecuado ambiente de trabajo contribuye con el buen desarrollo de los procesos de la organización que apoyan el flujo de las actividades del proyecto. Tabla A4.5.6.

Tabla A4.5.6. Relación Directa del FM Ambiente de Trabajo y los FM que Impacta

Influencia del Ambiente de Trabajo - WorkEnv (Y4)		
Ambiente de Trabajo - WorkEnv (Y4)	$Y_{54} = \beta_{54} Y_4$	$Y_{54} = 0.390 Y_4$

1.1.4 Influencia del Soporte operativo - SupporOp (Y5)

El SupporOp tiene una relación directa con dos factores: SPIImprov y ProImpr. P Se confirma la importancia de estas relaciones en la producción misma, así como también la importancia de la sincronización de los Atributos que definen el factor SupporOp para el mejor desempeño de la producción. Tabla A4.5.7.

Tabla A4.5.7. Relación Directa del FM Soporte Operativo y los FM que Impacta

Influencia del Soporte operativo - SupporOp (Y5)		
SupporOp (Y5) a SPIImprov (Y6)	$Y_{65} = \beta_{65} Y_5$	$Y_{65} = 0.650 Y_5$
SupporOp (Y5) a ProImpr (Y7)	$Y_{75} = \beta_{75} Y_5$	$Y_{75} = 0.387 Y_5$

1.1.5 Influencia del Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y6)

El SPImprov tiene relación directa de 0.323 con ProImpr (Y7). El mejoramiento del sistema de producción busca la eliminación de todos aquellos elementos que se oponen al flujo de la producción, así como la aplicación de los principios LC que contribuyen al mejoramiento del sistema. Tabla A4.5.8.

Tabla A4.5.8: Relación Directa del FM Mejoramiento del Sistema de Producción y los FM que Impacta

Influencia del Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y6)		
Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y6)	$Y_{76} = \beta_{76} Y_6$	$Y_{76} = 0.323 Y_6$

1.1.6 Ensamble de las Ecuaciones Estructurales para Efectos Directos

Las ecuaciones estructurales son del tipo:

$$Y_j = \sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)} + \sum \lambda_{ji} X_i + \zeta$$

Donde:

Y_j : Factor de madurez

X_i : Atributo de madurez

β_{ij} : Coeficiente de ruta entre factores de madurez

λ_{ji} Carga factorial del Atributo de madurez

ζ : Error de estimación del factor

$\sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)}$: corresponde a los efectos de las rutas directas que llegan al factor j.

El error corresponde a la estimación de los efectos en el FM. Este error no se considera en razón a que hay suficiente información recolectada (Kline, 2011). Esto se fundamenta en que se requería una muestra mínima de 90 respuestas y se obtuvieron 111, en la medida en que la muestra aumenta este error es más pequeño (García, 2011). Así, las ecuaciones para cada FM con relación a los efectos directos contienen el efecto de los Atributos que lo explican y la influencia del o los FM que lo impacta.

$Y_j = \sum \beta_{j(j-1)} Y_{(j-1)} + \sum \lambda_{ji} X_i,$ Donde Y_{j-1} : Son los factores de los cuales se recibe el efecto.

$$Y_2 = \beta_{21} Y_1 + \sum \lambda_{2i} X_i, \quad (9)$$

$$Y_3 = \beta_{31} Y_1 + \beta_{32} Y_2 + \sum \lambda_{3i} X_i, \quad (10)$$

$$Y_4 = \beta_{43} Y_3 + \beta_{42} Y_2 + \sum \lambda_{4i} X_i, \quad (11)$$

$$Y_5 = \beta_{51} Y_1 + \beta_{52} Y_2 + \beta_{54} Y_4 + \sum \lambda_{5i} X_i, \quad (12)$$

$$Y_6 = \beta_{62} Y_2 + \beta_{65} Y_5 + \sum \lambda_{6i} X_i, \quad (13)$$

$$Y_7 = \beta_{73} Y_3 + \beta_{75} Y_5 + \beta_{76} Y_6 + \sum \lambda_{7i} X_i, \quad (14)$$

1.1.7 Significancia de las Relaciones Directas

En este modelo, todas las relaciones directas son significativas, verificadas a través de los Valores P de los coeficientes β mostrados en la Tabla A4.5.9. El Valor P confirma que la relación es significativa y que la relación representada por la flecha es correcta, este es otro elemento confirmatorio del SEM.

Este modelo cuenta con 13 relaciones directas, ocho de las 13 relaciones con Valor P menores a 0.001, y cinco de ellas con Valor P entre 0.002 y 0.008 todas igualmente significativas para el estudio. La relación entre CommTM y TeamWork con 0.02, TeamWork y WorkEnv con 0.02, LeaderSh y TeamWork con 0.03, LeaderSh y SPImprov con Valor P de 0.007 y LeaderSh y SupporOp con Valor P de 0.008, ver Tabla 9. El Valor P más alto corresponde a 0.008, lo que corresponde a una confiabilidad del 99.2%, un buen nivel de confianza de la relación directa entre estos dos factores. “Esto se debe al hecho de que los Valores P reflejan no solo la fuerza de la relación (que ya viene dada por el coeficiente de ruta en sí) sino también la potencia de la prueba, que aumenta con el tamaño de la muestra. Cuanto mayor sea el tamaño de la muestra, menor será el Valor de P para el Coeficiente de Ruta, es estadísticamente más significativo” (Kock, 2017).

Tabla A4.5.9. Valor P de los coeficientes β_{ji} del modelo estructural.

Valor P de los Coeficientes β_{ji} del Modelo Estructural - Efecto Directo							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	<0.001						
TeamWork	0.002	0.003					
WorkEnv		<0.001	0.002				
SupporOp	<0.001	0.008		<0.001			
SPImprov		0.007			<0.001		
ProImpr			<0.001		<0.001	<0.001	

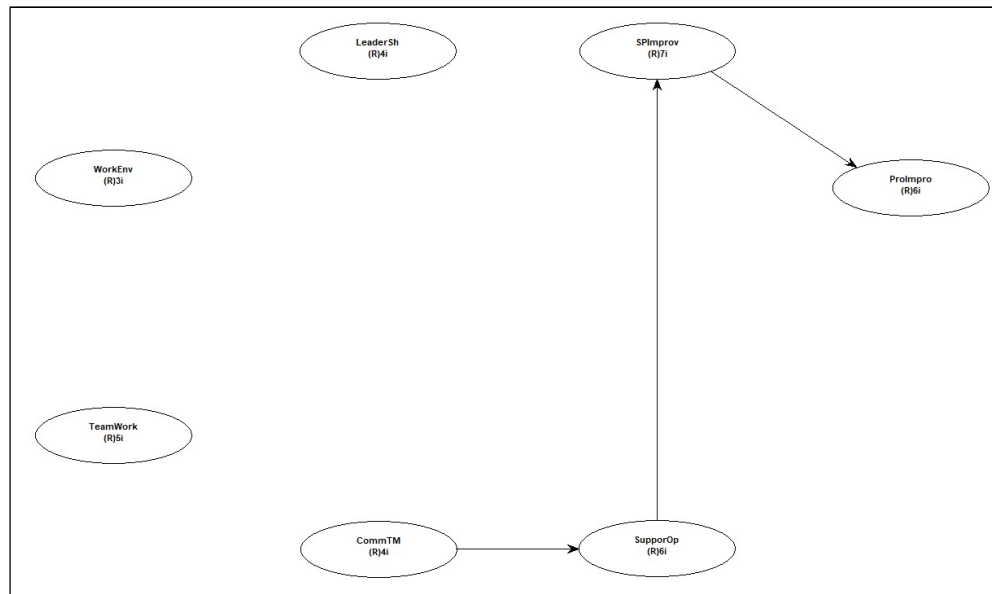
1.2 Tamaño de los efectos directos para los factores de madurez

La contribución de los FM exógenos en el FM endógeno se expresa con el indicador R^2 . El tamaño del efecto permite evaluar cómo el FM exógeno contribuye en la identificación del FM endógeno como una medida de relevancia predictiva. El coeficiente determina la calidad del modelo para replicar los resultados, y la proporción de variación de los resultados que puede explicarse por el modelo, o la proporción de la varianza total de la variable explicada por la regresión. Este indicador refleja la bondad del ajuste del modelo para explicar la madurez.

En el modelo, este indicador se calcula para cada FM dependiente como un resultado del WarpPLS. Los tamaños de los efectos se leen en el cruce de la columna del FM independiente sobre el FM en el que produce el efecto como puede ser observado en la Tabla 4.20. La medida del efecto puede mostrar un efecto pequeño con 0.02, mediano para 0.15, o grande para 0.35. Sin embargo, esta escala recomendada por (Kock, 2017), no establece intervalos para el análisis, por lo cual para esta investigación se establecen los siguientes intervalos Efectos pequeños entre (0.02, 0.15), Efectos medianos entre [0.15, 0.35) y Efectos grandes a partir del 0.35. Los efectos se describen a continuación de acuerdo con la Tabla A4.5.10.

Se presta particular atención a los efectos grandes (β_i), por medio de ellos se conforma la Ruta Crítica del modelo, En este caso, la ruta crítica corresponde a Compromiso de la Alta Dirección (CommTM), Soporte Operativo (SupporOp), Mejoramiento del Sistema de Producción (SPImprov) y Mejoramiento de la Producción (ProImpr), ver Figura A4.5.1.

Figura A4.5.1. Ruta Crítica de efectos del Modelo. La ruta más influyente.



- **Efecto en Liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)**

LeaderSh recibe un solo efecto mediano del FM independiente CommTM. Este efecto corresponde a. 31.1%, $R^2=0.311$. El CommTM influye directamente en LeaderSh lo que permite desplegar en el sistema de producción su influencia en factores que impactan la eficiencia de la producción.

- **Efecto en Trabajo en Equipo – TeamWork (Y₃)**

TeamWork recibe efectos de dos factores. Un efecto grande de CommTM con 0.345 y un efecto mediano de LeaderSh de 0.194. Estos efectos sumados en el factor corresponden al 53.9%, $R^2=0.539$.

- **Efecto en Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y₄)**

WorkEnv recibe efecto de dos factores. Un efecto mediano de LeaderSh de 0.30 y un efecto mediano de TeamWork de 0.169. Estos efectos sumados en el factor corresponden al 46.9%, $R^2=0.469$.

- **Efecto en Soporte Operativo – SupporOp (Y₅)**

SupporOp recibe efectos de tres factores. Un efecto mediano de WorkEnv de 0.225, el efecto grande de CommTM de 0.546 y el efecto pequeño de LeaderSh de 0.119. Estos efectos sumados en el factor corresponden al 89.0%, $R^2=0.890$.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y₆)**

SPImprov recibe efectos de dos factores, uno pequeño de Liderazgo Lean (LeaderSh) 0.063 considerado como importante en el estudio de las relaciones del modelo, y SupporOp con un efecto grande de 0.459. Estos efectos sumados en el factor corresponden al 52.2%, $R^2=0.522$.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

El Mejoramiento de la Producción (ProImpr) recibe los efectos de tres factores, todos ellos medianos. Trabajo en Equipo (TeamWork) 0.172, Soporte Operativo (SupporOp) 0.294 y Mejoramiento del Sistema de Producción (SPImprov) 0.240. Estos efectos sumados corresponden a la validez predictiva del factor en un 70.6%, $R^2=0.706$.

Tabla A4.5.10. Tamaño de los efectos. La última columna corresponde a la suma de los efectos directos en el FM endógeno, este efecto total directo se confirma en la Figura 4.6 del capítulo 4.

Tamaño de los Efectos - Efecto Directo								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh	0.311							0.311
TeamWork	0.345	0.194						0.539
WorkEnv		0.300	0.169					0.469
SupporOp	0.546	0.119		0.225				0.890
SPImprov		0.063			0.459			0.522
ProImpr			0.172		0.294	0.240		0.706

Los efectos de los factores independientes en los factores dependientes en general son grandes, en un rango que va desde el 31.1% al 89.0%. En todo el modelo, los efectos medianos corresponden al 53.85%, los efectos grandes al 38.46% y un efecto pequeño que corresponde el 7.69%.

1.2.1 Relaciones Indirectas entre los Factores de Madurez

En ocasiones los efectos indirectos pueden llegar a ser más importantes que los efectos directos. Esto tiene que ver con que las variables mediadoras, o las que aparecen en el camino desde un FM exógeno hasta el endógeno, influyen en este efecto.

Los efectos en este modelo se presentan entre dos y seis segmentos, el número de segmentos depende de la cantidad de relaciones en el modelo que se requieran para llegar desde un FM exógeno al endógeno más alejado. A continuación, se realiza el análisis de las relaciones causales y los efectos indirectos para rutas de dos, tres, cuatro, cinco y seis segmentos. También se calculan los intervalos de confianza, los cuales pueden consultarse en el en el Anexo 4.6 y 4.6a para las rutas con segmentos entre 2 y 6. En este Anexo mencionado también se presentan las tablas con los Valores P y los Errores estándar correspondientes con los cuales se apoyan los análisis de esta sección.

Los intervalos de confianza para las otras relaciones indirectas pueden ser consultados en el Anexo 4.5A.

2.1 Efectos Indirectos para Rutas de DOS SEGMENTOS y Tamaños de los Efectos

Este análisis detalla la relación causal en un FM endógeno a causa de uno o más FM exógenos ubicados dos segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la 4.6 del capítulo 4 de la sección anterior y se detallan en el Anexo 4.6. En este anexo describen las rutas en el modelo Tabla A4.5.11.

Tabla A4.5.11. Número de Rutas con dos segmentos

Número de Rutas con Dos Segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	1						
WorkEnv	2	1					
SupporOp	1	1	1				
SPImprov	2	1		1			
ProImpr	2	3		1	1		

Para cada ruta de dos segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5.12 a continuación. De igual manera en el Anexo 4.5A se presentan estos efectos.

Tabla A4.5.12. Efectos indirectos de dos segmentos.

Efectos indirectos de Dos Segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	0.181						
WorkEnv	0.410	0.096					
SupporOp	0.179	0.183	0.115				
SPImprov	0.560	0.209		0.254			
ProImpr	0.419	0.264		0.151	0.210		

2.1.1 Influencia del Compromiso de la Alta Dirección - CommTM (Y₁)

El FM CommTM es el factor independiente en el modelo. Con rutas de dos segmentos, este factor tiene influencia en TeamWork, WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el FM que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada FM endógeno. El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos identificados por β_{ji} presentes en las rutas. Son ocho rutas de dos segmentos por los cuales el FM CommTM (Y₁) influye en los otros.

- **CommTM (Y₁) a TeamWork (Y₃):** Efecto en una ruta de dos segmentos.

$$\text{Ruta 1:} \quad \text{CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{TeamWork} = 0.558 * 0.324 = 0.181$$

$$Y_{31} = \beta_{21} * \beta_{32} * Y_1 \quad (15)$$

El Trabajo en Equipo recibe influencia indirecta CommTM, a través de LeaderSh. Como se vio en el análisis de las relaciones directas, el desarrollo del FM LeaderSh es muy importante, ya que es muy influyente en otros FM. En este caso, el Trabajo en equipo requiere no solo del apoyo de CommTM de manera directa, si no que a través de LeaderSh ejerce influencia en este FM.

- **CommTM (Y₁) a WorkEnv (Y₄):** Efecto en dos rutas de dos segmentos cada una.

Ruta 1: $\text{CommTM} - \text{TeamWork} - \text{WorkEnv} = 0.506 * 0.295 = 0.149$

Ruta 2: $\text{CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{WorkEnv} = 0.558 * 0.468 = 0.261$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.410

$$Y_{41} = \beta_{21} * \beta_{42} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * Y_1 \quad (16)$$

El ambiente de trabajo recibe efecto de CommTM a través de TeamWork y LeaderSh. Siendo la ruta mediada por LeaderSh la que más influye en la construcción del ambiente de trabajo, esto no quiere decir que el equipo de trabajo no contribuya de manera importante con este ambiente. El efecto de ambas rutas de 0.410 es tan importante como el directo del factor LeaderSh 0.468.

- **CommTM (Y₁) a SupporOp (Y₅):** Efecto en una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: $\text{CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{SupporOp} = 0.558 * 0.322 = 0.179$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{52} * Y_1 \quad (17)$$

El SupporOp recibe el efecto indirecto de CommTM por medio de LeaderSh. Sigue siendo LeaderSh un factor por medio del cual CommTM impacta a otros factores de manera positiva.

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** Efecto en dos rutas de dos segmentos cada una.

Ruta 1: $\text{CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{SPImprov} = 0.558 * 0.159 = 0.089$

Ruta 2: $\text{CommTM} - \text{SupporOp} - \text{SPImprov} = 0.726 * 0.650 = 0.472$

Efecto total debido a las dos rutas: 0.561

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{62} * Y_1 + \beta_{51} * \beta_{65} * Y_1 \quad (18)$$

El mejoramiento del sistema de producción se lleva a cabo de manera directa por LeaderSh y SupporOp. Por medio de estos factores, el CommTM influye indirecta y positivamente en SPImprov. La ruta mediada por SupporOp es la que más influye en la mejora del sistema de producción, 0.472. La ruta mediada por LeaderSh no es muy influyente. Este modelo muestra

que son los procesos de apoyo de la organización los que contribuyen al mejoramiento del sistema de producción con la disponibilidad de Sistemas de información, Operaciones logísticas, Proceso de gestión contractual, Implementación de un sistema de gestión y la Gestión del conocimiento.

El efecto de ambas rutas en este FM es de 0.561. Este efecto es tan importante como el efecto directo del FM SupporOp de 0.650.

- **CommTM (Y1) a ProImpr (Y7): Efecto en dos rutas de dos segmentos cada una.**

Ruta 1: $\text{CommTM} - \text{SupporOp} - \text{ProImpr} = 0.726 * 0.387 = 0.281$

Ruta 2: $\text{CommTM} - \text{TeamWork} - \text{ProImpr} = 0.506 * 0.272 = 0.138$

Efecto total debido a las dos rutas: 0.419

$$Y_{71} = \beta_{51} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{73} * Y_1 \quad (19)$$

El mejoramiento de la producción se lleva a cabo de manera directa por SupporOp y TeamWork, y es así que el CommTM influye indirecta y positivamente en SPImprov a través de ellos. La ruta mediada por SupporOp la que más influye en la mejora de la producción, 0.281. La ruta mediada por TeamWork es medianamente influyente, a pesar que son los equipos de trabajo los responsables de la producción, sin embargo se requiere de los Atributos del FM SupporOp para esta mejora de la producción, la cual es más influyente.

El efecto de ambas rutas es de 0.419, **este es un efecto importante en estas relaciones.**

2.1.2 Influencia del Liderazgo Lean – LeaderSh (Y2)

El FM LeaderSh tiene influencia por dos segmentos en cuatro FM: WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. El Liderazgo Lean está influenciado directamente por el CommTM cuyas políticas y estrategias permiten el desarrollo de líderes a todos los niveles, a la vez este FM impacta en cuatro FM con la influencia de CommTM y los Atributos directamente relacionados. Son seis rutas.

- **LeaderSh (Y₂) a WorkEnv (Y₄): Efecto en una ruta de dos segmentos.**

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork – WorkEnv = 0.324 * 0.297 = 0.096

$$Y_{42} = \beta_{32} * \beta_{73} * Y_2 \quad (20)$$

- **LeaderSh (Y₂) a SupporOp (Y₅): Efecto en una ruta de dos segmentos.**

Ruta 1: LeaderSh – WorkEnv – SupporOp = 0.468 * 0.390 = 0.183

$$Y_{52} = \beta_{42} * \beta_{54} * Y_2 \quad (21)$$

- **LeaderSh (Y₂) a SPImprov (Y₆): Efecto en una ruta de dos segmentos.**

Ruta 1: LeaderSh – SupporOp – SPImprov = 0.322 * 0.650 = 0.209

$$Y_{62} = \beta_{52} * \beta_{65} * Y_2 \quad (22)$$

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇): Efecto en tres rutas de dos segmentos**

Ruta 1: LeaderSh – SPImprov – ProImpr = 0.159 * 0.323 = 0.051

Ruta 2: LeaderSh – TeamWork – ProImpr = 0.324 * 0.272 = 0.088

Ruta 3: LeaderSh – SupporOp – ProImpr = 0.322 * 0.387 = 0.125

Efecto debido a las tres rutas es de: 0.264

$$Y_{72} = \beta_{62} * \beta_{76} * Y_2 + \beta_{32} * \beta_{73} * Y_2 + \beta_{52} * \beta_{75} * Y_2 \quad (23)$$

2.1.3 Influencia del Trabajo en Equipo – TeamWork (Y₃)

El TeamWork tiene influencia en el FM SupporOp, el cual es muy influyente desde los procesos de soporte de la organización en la producción misma. Esta influencia se refleja en una ruta. Es una ruta.

- **TeamWork (Y₃) a SupporOp (Y₅):**

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp = 0.295 * 0.390 = 0.115

$$Y_{53} = \beta_{43} * \beta_{54} * Y_3 \quad (24)$$

2.1.4 Influencia del Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y4)

El FM WorkEnv tiene influencia por dos segmentos en dos FM: SPImprov y ProImpr. El efecto del ambiente de trabajo es importante en para el desarrollo de estos dos FM, los cuales son los responsables de la eficiencia de la producción. Son dos rutas.

- **WorkEnv (Y4) a SPImprov (Y6): Efecto en una ruta de dos segmentos.**

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – SPImprov = $0.390 * 0.65 = 0.254$

$$Y_{64} = \beta_{54} * \beta_{65} * Y_4 \quad (25)$$

- **WorkEnv (Y4) a ProImpr (Y7): Efecto en una ruta de dos segmentos.**

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – ProImpr = $0.390 * 0.387 = 0.151$

$$Y_{74} = \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 \quad (26)$$

2.1.5 Influencia del Soporte Operativo – SupporOp (Y5)

El SupporOp influye indirectamente en ProImpr a través de SPImprov. El mejoramiento del sistema de producción tiene una alta influencia de los procesos de la organización que soportan la producción. Esta influencia se lleva a cabo por una ruta de dos segmentos.

- **SupporOp (Y5) a ProImpr (Y7): Efecto en una ruta de dos segmentos.**

Ruta 1: SupporOp – SPImprov – ProImpr = $0.650 * 0.323 = 0.210$

$$Y_{75} = \beta_{65} * \beta_{76} * Y_5 \quad (27)$$

2.1.6 Tamaño de los Efectos Indirectos para DOS SEGMENTOS

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños,

medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. Estos tamaños en la Tabla A4.5.13.

Tabla A4.5.13. Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos.

Tamaño de los Efectos Indirectos de Dos Segmentos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork	0.123							0.123
WorkEnv	0.207	0.062						0.269
SupporOp	0.135	0.067	0.053					0.255
SPImprov	0.334	0.082		0.090				0.506
ProImpr	0.317	0.145		0.089	0.160			0.711

- **Efecto en Liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)**

LeaderSh no recibe efectos indirectos solo recibe efectos directos como se presentó anteriormente. No se presenta en la tabla.

- **Efecto en Trabajo en Equipo – TeamWork (Y₃)**

TeamWork recibe efecto de CommTM, su tamaño es de 0.123 que es un efecto pequeño sin embargo muestra su influencia indirecta en TeamWork. $R^2 = 0.123$

- **Efecto en Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y₄)**

WorkEnv recibe efecto de CommTM 0.207 que es un efecto mediano y LeaderSh 0.062 un efecto pequeño, siendo más importante la influencia de CommTM en el WorkEnv. Sin embargo, el efecto combinado es de $R^2 = 0.269$ que configura un efecto mediano.

- **Efecto en Soporte Operativo – SupporOp (Y₅)**

SupporOp recibe efectos de TeamWork 0.053 que es un efecto pequeño, de CommTM 0.135 también un efecto pequeño y de LeaderSh 0.067 un efecto pequeño. La suma de los efectos es de $R^2 = 0.255$ que corresponde a un efecto mediano. Son estos tres factores en conjunto que influyen en SupporOp con dos segmentos, lo que quiere decir que los factores

mediadores en cada uno de los casos son importantes de manera conjunta para el efecto en este factor.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y₆)**

SPImprov recibe efecto pequeño de TeamWork 0.090, Un efecto mediano de CommTM de 0.334 y uno pequeño de LeaderSh 0.082, sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.506$ que es un efecto grande de estos factores. Un efecto que es casi del mismo tamaño que el efecto directo que recibe de 0.522 que recibe de SupporOp y LeaderSh que se explicó en el aparte del análisis del tamaño de los efectos directos.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de WorkEnv 0.089, un efecto mediano de CommTM 0.317, un efecto mediano de SupporOp 0.16 y un efecto pequeño de 0.145 de LeaderSh, aunque este último está muy cercano al límite de efecto grande no debe ser subestimado, ya que estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.711$, un efecto mayor al efecto directo de los factores de los que recibe influencia.

2.2 Efectos Indirectos para Rutas de TRES SEGMENTOS y Tamaños de los Efectos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de uno o más factores exógenos ubicados tres segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del capítulo 4 de la sección anterior y se detallan en el Anexo 4.6 y 4.6a. En este anexo describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo. Tabla A4.5.14.

Tabla A4.5.14. Número de Rutas con Tres Segmentos

Número de Rutas con Tres Segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv	1						
SupporOp	2	1					
SPImprov	1	1	1				
ProImpr	4	2	1	1			

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5.15 a continuación.

Tabla A4.5.15. Efectos indirectos de tres segmentos.

Efectos Indirectos de Tres Segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv	0.053						
SupporOp	0.160	0.037					
SPImprov	0.117	0.119	0.075				
ProImpr	0.299	0.138	0.045	0.082			

2.2.1 Influencia del Compromiso de la Alta Dirección - CommTM (Y₁)

Con rutas de tres segmentos, este factor tiene influencia en WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno. Son ocho rutas por las cuales este FM ejerce su influencia.

- **CommTM (Y₁) a WorkEnv (Y₄):** este efecto se presenta por una ruta de tres segmentos.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh - TeamWork – WorkEnv = $0.558 * 0.324 * 0.295 = 0.053$

Efecto debido a esta ruta es de: 0.053

$$Y_{41} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * Y_1 \quad (28)$$

- **CommTM (Y₁) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp = $0.558 * 0.468 * 0.39 = 0.102$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp = $0.506 * 0.295 * 0.39 = 0.058$

Efecto de las dos rutas de tres segmentos: $0.102 + 0.058 = 0.160$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_1 \quad (29)$$

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp - SPImprov = $0.558 * 0.322 * 0.65 = 0.117$

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{65} * Y_1 \quad (30)$$

- **CommTM (Y1) a ProImpr (Y7):** este efecto se presenta por cuatro rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SPImprov -ProImpr = $0.558 * 0.159 * 0.323 = 0.029$

Ruta 2: CommTM – LeaderSh – SupporOp -ProImpr = $0.558 * 0.322 * 0.387 = 0.070$

Ruta 3: CommTM – LeaderSh – TeamWork – ProImpr = $0.506 * 0.327 * 0.272 = 0.049$

Ruta 4: CommTM – SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.726 * 0.650 * 0.323 = 0.152$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.299

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{62} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{73} * Y_1 + \beta_{51} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (31)$$

2.2.2 Influencia del Liderazgo Lean – LeaderSh (Y2)

El Factor LeaderSh tiene influencia por tres segmentos en tres factores: SupporOp, SPImprov y ProImpr.

- **LeaderSh (Y2) a SupporOp (Y5):** este efecto se presenta por una ruta

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp = $0.324 * 0.295 * 0.390 = 0.037$

$$Y_{52} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_2 \quad (32)$$

- **LeaderSh (Y2) a SPImprov (Y6):** este efecto se presenta por una ruta

Ruta 1: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp – SPImprov = $0.468 * 0.39 * 0.650 = 0.119$

$$Y_{62} = \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_2 \quad (33)$$

- **LeaderSh (Y2) a ProImpr (Y7):** este efecto se presenta por dos rutas

Ruta 1: LeaderSh – SupporOp - SPImprov – ProImpr = $0.322 * 0.65 * 0.323 = 0.068$

Ruta 2: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp– ProImpr = $0.468 * 0.390 * 0.387 = 0.071$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.138

$$Y_{72} = \beta_{52} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 + \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 \quad (34)$$

2.2.3 Influencia del Trabajo en Equipo – TeamWork (Y3)

El TeamWork tiene influencia en los FM en SPImprov y ProImpr. Son dos rutas por las que este FM ejerce influencia.

- **TeamWork (Y3) a SPImprov (Y6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPImprov = $0.295 * 0.390 * 0.65 = 0.075$

$$Y_{63} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_3 \quad (35)$$

- **TeamWork (Y3) a ProImpr (Y7):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – ProImpr = $0.295 * 0.390 * 0.387 = 0.045$

$$Y_{73} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_3 \quad (36)$$

2.2.4 Influencia del Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y4)

El FM WorkEnv tiene influencia en ProImpr.

- **WorkEnv (Y4) a ProImpr(Y7):**

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.082$

$$Y_{74} = \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_4 \quad (37)$$

2.2.5 Tamaño de los Efectos Indirectos para TRES SEGMENTOS

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores

que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. En tres rutas no hay efectos en TeamWork y LeaderSh. Tabla A4.5.16.

Tabla A4.5.16. Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos.

Tamaño de los Efectos Indirectos de Tres Segmentos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv	0.027							0.027
SupporOp	0.121	0.014						0.135
SPImprov	0.070	0.047	0.026					0.143
ProImpr	0.227	0.076	0.028	0.048				0.379

- **Efecto en Liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)**

LeaderSh no recibe efectos indirectos solo recibe efectos directos como se presentó anteriormente.

- **Efecto en Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y₄)**

WorkEnv recibe efecto de CommTM 0.027 que es un efecto pequeño. El efecto para tres segmentos es de $R^2 = 0.027$.

- **Efecto en Soporte Operativo – SupporOp (Y₅)**

SupporOp recibe efectos de CommTM 0.121 que es un efecto pequeño y de LeaderSh 0.014 también un efecto pequeño. La suma de los efectos es de $R^2 = 0.135$ que corresponde a un efecto pequeño.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y₆)**

SPImprov recibe efecto pequeño de TeamWork 0.026, Un efecto pequeño de CommTM de 0.070 y uno pequeño de LeaderSh 0.047, sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.143$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de TeamWork de 0.028, WorkEnv 0.048, un efecto mediano de CommTM 0.227 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.076. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.379$, un efecto grande.

2.3 Efectos Indirectos para Rutas de CUATRO SEGMENTOS y Tamaño de los Efectos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de uno o más factores exógenos ubicados cuatro segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del capítulo 4 de la sección anterior y se detallan en el Anexo A4.6 y A4.6a. En este anexo describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo. Tabla A4.5.17.

Tabla A4.5.17. Número de Rutas con Cuatro Segmentos

Número de Rutas con Cuatro Segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp	1						
SPImprov	2	1					
ProImpr	3	2	1				

Para cada ruta de cuatro segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5.18 a continuación.

Tabla A4.5.18. Efectos indirectos de cuatro segmentos.

Efectos indirectos de Cuatro Segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp	0.021						
SPImprov	0.104	0.024					
ProImpr	0.100	0.053	0.024				

2.3.1 Influencia del Compromiso de la Alta Dirección - CommTM (Y₁)

Con rutas de cuatro segmentos, este factor tiene influencia en SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y₁) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp = 0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.39 = 0.021

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_1 \quad (38)$$

Esta relación se considera NO válida Ver Anexo 4.6.

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp - SPImprov = 0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.65 = 0.066

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv – SupporOp - SPImprov = 0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.65 = 0.038

El efecto combinado de las dos rutas es 0.104

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 \quad (39)$$

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp - SPImprov - ProImpr = $0.558 * 0.322 * 0.65 * 0.323 = 0.038$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp -ProImpr = $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.387 = 0.023$

Ruta 3: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp – ProImpr = $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.387 = 0.039$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.100

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 \quad (40)$$

2.3.1.1.1 Influencia del Liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)

El Factor LeaderSh tiene influencia por cuatro segmentos en dos factores: SPImprov y ProImpr.

- **LeaderSh (Y₂) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp – SPImprov = $0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.650 = 0.024$

$$Y_{62} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_2 \quad (41)$$

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por dos rutas

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp - ProImpr = $0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.387 = 0.068$

Ruta 2: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp– SPImprov - ProImpr = $0.468 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.014$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.053

$$Y_{72} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 + \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 \quad (42)$$

2.3.2 Influencia del Trabajo en Equipo – TeamWork (Y3)

El TeamWork tiene influencia en el factor en ProImpr.

- **TeamWork (Y3) a ProImpr (Y7):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.295 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.024$

$$Y_{73} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_3 \quad (43)$$

2.3.3 Tamaño de los Efectos Indirectos para CUATRO SEGMENTOS

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influncian directamente como se verá a continuación. En tres rutas no hay efectos en TeamWork y LeaderSh. Tabla A4.5.19.

Tabla A4.5.19. Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos.

Tamaño de los Efectos Indirectos de Cuatro Segmentos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv								
SupporOp	0.016							0.016
SPImprov	0.062	0.010						0.072
ProImpr	0.076	0.029	0.015					0.120

- **Efecto en Soporte Operativo – SupporOp (Y5)**

SupporOp recibe un efecto pequeño de CommTM 0.016. $R^2 = 0.016$.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y6)**

SPIImprov recibe efecto pequeño de CommTM de 0.062 y uno pequeño de LeaderSh 0.010, sin embargo los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.072$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de TeamWork de 0.015, un efecto pequeño de CommTM 0.076 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.029. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.120$, un efecto pequeño.

2.4 Efectos Indirectos para Rutas de CINCO SEGMENTOS y Tamaño de los Efectos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de uno o más factores exógenos ubicados cinco segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del capítulo 4 de la sección anterior y se detallan en el Anexo 4.6 y 4.6a. En este anexo describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo. Tabla A4.5.20.

Tabla A4.5.20. Número de Rutas con Cinco Segmentos

Número de Rutas con Cinco Segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPIImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp							
SPIImprov	1						
ProImpr	3	1					

Para cada ruta de cinco segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5.21 a continuación. De igual manera en el Anexo 4.6 se presentan.

Tabla A4.5.21. Número de Rutas con Cinco Segmentos

Efectos indirectos de Cinco Segmentos							
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork							
WorkEnv							
SupporOp							
SPImprov	0.014						
ProImpr	0.042	0.008					

Tabla 21. Efectos indirectos de cinco segmentos.

2.4.1 Influencia del Compromiso de la Alta Dirección - CommTM (Y₁)

Con rutas de cinco segmentos, este FM tiene influencia en SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el FM de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada FM endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp - SPImprov = 0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.65 = 0.014

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 \quad (44)$$

Esta relación se considera NO válida Ver Anexo 4.6

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv - SupporOp - ProImpr = 0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.390 * 0.387 = 0.008

Ruta 2: CommTM – LeaderSh - WorkEnv - SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.021

Ruta 3: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp – SPImprov - ProImpr = 0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.012

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.042

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} Y_1 \quad (45)$$

2.4.2 Influencia del Liderazgo Lean – LeaderSh (Y2)

El Factor LeaderSh tiene influencia por cinco segmentos en un factor: ProImpr.

- **LeaderSh (Y2) a ProImpr (Y7):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.008$

$$Y_{72} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 \quad (46)$$

2.4.3 Tamaño de los Efectos Indirectos para CINCO SEGMENTOS

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Tabla A4.5.222.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y6)**

SPImprov recibe efecto pequeño de CommTM de 0.008. $R^2 = 0.088$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y7)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de CommTM 0.017 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.004. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia pequeña sobre la producción de un $R^2 = 0.036$, un efecto pequeño.

Tabla A4.5.22. Tamaño de los Efectos Indirectos de Cinco Segmentos.

Tamaño de los Efectos Indirectos de Cinco Segmentos								
	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr	Efecto Total
CommTM								
LeaderSh								
TeamWork								
WorkEnv								
SupporOp								
SPImprov	0.008							0.008
ProImpr	0.032	0.004						0.036

2.5 Efectos Indirectos para Rutas de SEIS SEGMENTOS y Tamaño de los Efectos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de uno o más factores exógenos ubicados cinco segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del capítulo 4 y se detallan en el Anexo 4.5A. En este anexo describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo. Solo se presenta un efecto para una ruta de seis segmentos desde CommTM a ProImpr, cuyo efecto indirecto es de 0.04 con un valor P de 0.063.

2.5.1 Influencia del Compromiso de la Alta Dirección - CommTM (Y₁)

Con rutas de cinco segmentos, este factor tiene influencia en SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv - SupporOp – SPImprov - ProImpr
 $= 0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.004$

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (47)$$

Esta relación se considera NO válida Ver Anexo 4.6

2.5.2 Tamaño de los Efectos Indirectos para SEIS SEGMENTOS

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de CommTM 0.003. Este factor de manera indirecta ejerce una influencia pequeña sobre la ProImpr de un $R^2 = 0.003$, es un efecto muy pequeño, no es importante.

2.6 Efectos Totales y Tamaño de los Efectos

Corresponden a los efectos directos más los efectos indirectos. En la Tabla A4.5.23 se resumen los efectos entre los FM. Los directos analizados en el aparte 4.3.3.4, los efectos indirectos de todas las rutas agrupadas en cada interacción entre el FM independiente y el FM dependiente y la suma de ambos tipos de efectos.

Tabla A4.5.23. Resumen de los Efectos en el Modelo.

EFECTOS DIRECTOS							
FACTOR ENDÓGENO	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,506	0,324					
WorkEnv		0,468	0,295				
SupporOp	0,726	0,322		0,390			
SPImprov		0,159			0,650		
ProImpr			0,272		0,387	0,323	

SUMA DE LOS EFECTOS INDIRECTOS							
FACTOR ENDÓGENO	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh							
TeamWork	0,181						
WorkEnv	0,464	0,096					
SupporOp	0,361	0,220	0,115				
SPImprov	0,795	0,352	0,075	0,254			
ProImpr	0,864	0,463	0,069	0,233	0,210		

EFECTOS TOTALES							
FACTOR ENDÓGENO	CommTM	LeaderSh	TeamWork	WorkEnv	SupporOp	SPImprov	ProImpr
CommTM							
LeaderSh	0,558						
TeamWork	0,687	0,324					
WorkEnv	0,464	0,564	0,295				
SupporOp	1,087	0,542	0,115	0,390			
SPImprov	0,795	0,511	0,075	0,254	0,650		
ProImpr	0,864	0,463	0,341	0,233	0,597	0,323	

Los efectos directos e indirectos se analizar previamente, sin embargo, la suma de los efectos indirectos muestra un panorama especial.

2.6.1 Efectos Indirectos Pequeños

Corresponden a las relaciones entre LeaderSh y TeamWork 0.096, TeamWork y SPImprov de 0.075 y TeamWork y ProImpr demostrando que estos efectos no son muy importantes. El efecto entre TeamWork y SupporOp, aunque está en el rango de efectos pequeños, se muestra influyente en SupporOp.

2.6.2 Efectos Medianos

CommTM y TeamWork con 0.181, LeaderSh y SupporOp con 0.220, WorkEnv y SPIImprov con 0.254, WorkEnv y ProImpr con 0.233 y SupporOp y ProImpr con 0.210. Todos ellos medianos y cada vez más importantes para el desempeño del modelo.

2.6.3 Efectos Grandes

El efecto del resto de relaciones es grande, por encima de 0.352 que corresponde a Leader y SPIImprov. El efecto más grande se produce en la relación que hay entre CommTM y ProImpr de 0.864, efectos muy importantes para el desempeño del modelo.

2.6.4 Efectos Moderadores

En este modelo no se presentan acciones para Variables Moderadoras

Anexo 4.5A

Efectos Indirectos entre los Factores de Madurez

4.6.1 Efectos indirectos para rutas de dos segmentos

Este análisis detalla la relación causal en un FM endógeno a causa de dos FM exógenos ubicados dos segmentos atrás de él. Estas rutas se aprecian en la Figura 4.6 del Capítulo 4. En este anexo describen las rutas en el modelo, de dos a seis segmentos presentes en el modelo.

Tabla A4.5A.1. Numero de Pasos con dos segmentos

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork			1				
WorkEnv			2		1		
CommTM							
SupporOp	1		1		1		
LeaderSh							
SPImprov		1	2		1		
ProImpr		1	2	1	3		

Para cada ruta de dos segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5A.2 a continuación. De igual manera se revisan los Valores P para cada una de las relaciones de tal manera que con valores ≤ 0.01 se consideran las relaciones válidas. Tabla A4.5A.3.

4.6.1.1 Influencia del Compromiso de la Alta Gerencia - CommTM (Y1)

El factor CommTM es el factor independiente en el modelo. Con rutas de dos segmentos, este factor tiene influencia en TeamWork, WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y₁) a TeamWork (Y₃):** este efecto se presenta por una ruta de dos segmentos.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh - TeamWork = 0.558 * 0.324 = 0.181

$$Y_{31} = \beta_{21} * \beta_{32} * Y_1 \quad (14)$$

En la Tabla 4 se muestran los errores para la relación indirecta de dos segmentos. El error para esta relación, $\delta = 0.007$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.181 + 1.96 * 0.007 = 0.318$$

$$LI = 0.181 - 1.96 * 0.007 = 0.044$$

Entonces $0.044 \leq \beta_{31} \leq 0.318$

El Trabajo en Equipo recibe influencia indirecta CommTM, a través de LeaderSh. Como se vio en el análisis de las relaciones directas, el desarrollo del factor LeaderSh es muy importante, ya que es muy influyente en otros factores. En este caso, el Trabajo en equipo requiere no solo del apoyo de CommTM de manera directa, si no que a través de LeaderSh ejerce influencia en este factor.

- **CommTM (Y₁) a WorkEnv (Y₄):** este efecto se presenta por dos rutas de dos segmentos cada una.

Ruta 1: CommTM – TeamWork – WorkEnv = 0.506 * 0.295 = 0.149

Ruta 2: CommTM – LeaderSh – WorkEnv = 0.558 * 0.468 = 0.261

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.410

$$Y_{41} = \beta_{21} * \beta_{42} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * Y_1 \quad (15)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.097$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.410 + 1.96 * 0.097 = 0.600$$

$$LI = 0.410 - 1.96 * 0.097 = 0.220$$

Entonces $0.220 \leq \beta_{41} \leq 0.600$

El ambiente de trabajo recibe efecto de CommTM a través de TeamWork y LeaderSh. Siendo la ruta mediada por LeaderSh la que más influye en la construcción del ambiente de trabajo, esto no quiere decir que el equipo de trabajo no contribuya de manera importante con este ambiente. El efecto de ambas rutas de 0.410 es tan importante como el directo del factor LeaderSh 0.468.

- **CommTM (Y₁) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por una ruta.

$$\text{Ruta 1: CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{SupporOp} = 0.558 * 0.322 = 0.179$$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{52} * Y_1 \quad (16)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.078$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.179 + 1.96 * 0.078 = 0.332$$

$$LI = 0.179 - 1.96 * 0.078 = 0.026$$

Entonces $0.026 \leq \beta_{51} \leq 0.332$

El SupporOp recibe el efecto indirecto de CommTM por medio de LeaderSh. Sigue siendo LeaderSh un factor por medio del cual CommTM impacta a otros factores de manera positiva.

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por dos rutas.

$$\text{Ruta 1: CommTM} - \text{LeaderSh} - \text{SPImprov} = 0.558 * 0.159 = 0.089$$

$$\text{Ruta 2: CommTM} - \text{SupporOp} - \text{SPImprov} = 0.726 * 0.650 = 0.472$$

Efecto total debido a las dos rutas: 0.561

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{62} * Y_1 + \beta_{51} * \beta_{65} * Y_1 \quad (17)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.085$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.561 + 1.96 * 0.085 = 0.728$$

$$LI = 0.561 - 1.96 * 0.085 = 0.394$$

Entonces $0.394 \leq \beta_{61} \leq 0.728$

El mejoramiento del sistema de producción se lleva a cabo de manera directa por LeaderSh y SupporOp. Por medio de estos factores, el CommTM influye indirecta y positivamente en SPImprov.

La ruta mediada por SupporOp la que más influye en la mejora del sistema de producción, 0.472. La ruta mediada por LeaderSh no es muy influyente, ya que son los procesos de apoyo de la organización los que contribuyen al mejoramiento del sistema de producción con la disponibilidad de Sistemas de información, Operaciones logísticas, Proceso de gestión contractual, Implementación de un sistema de gestión y la Gestión del conocimiento.

El efecto de ambas rutas es de 0.561 en tan importante como el directo del factor SupporOp de 0.650.

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por dos rutas.

$$\text{Ruta 1: CommTM} - \text{SupporOp} - \text{ProImpr} = 0.726 * 0.387 = 0.281$$

$$\text{Ruta 2: CommTM} - \text{TeamWork} - \text{ProImpr} = 0.506 * 0.272 = 0.138$$

Efecto total debido a las dos rutas: 0.419

$$Y_{71} = \beta_{51} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{73} * Y_1 \quad (18)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.091$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.419 + 1.96 * 0.091 = 0.597$$

$$LI = 0.419 - 1.96 * 0.091 = 0.240$$

Entonces $0.240 \leq \beta_{71} \leq 0.597$

El mejoramiento de la producción se lleva a cabo de manera directa por SupporOp y TeamWork, y es así que el CommTM influye indirecta y positivamente en SPImprov a través de ellos. La ruta mediada por SupporOp la que más influye en la mejora de la producción, 0.281. La ruta mediada por TeamWork es medianamente influyente, a pesar de que son los equipos de trabajo los responsables de la producción, sin embargo, se requiere de los atributos del factor SupporOp para esta mejora de la producción.

El efecto de ambas rutas es de 0.419, un efecto importante en estas relaciones.

4.6.1.2 Influencia del Liderazgo Lean – LeaderSh (Y2)

El Factor LeaderSh tiene influencia por dos segmentos en cuatro factores: WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. El Liderazgo Lean está influenciado directamente por el CommTM cuyas políticas y estrategias permiten el desarrollo de líderes a todos los niveles.

- **LeaderSh (Y₂) a WorkEnv (Y₄):** este efecto se presenta por una ruta

$$\text{Ruta 1: LeaderSh} - \text{TeamWork} - \text{WorkEnv} = 0.324 * 0.297 = 0.096$$

$$Y_{42} = \beta_{32} * \beta_{73} * Y_2 \quad (19)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.039$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.096 + 1.96 * 0.039 = 0.172$$

$$LI = 0.096 - 1.96 * 0.039 = 0.0196$$

Entonces $0.0196 \leq \beta_{42} \leq 0.172$

- **LeaderSh (Y₂) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por una ruta

$$\text{Ruta 1: LeaderSh} - \text{WorkEnv} - \text{SupporOp} = 0.468 * 0.390 = 0.183$$

$$Y_{52} = \beta_{42} * \beta_{54} * Y_2 \quad (20)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.058$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.183 + 1.96 * 0.058 = 0.297$$

$$LI = 0.183 - 1.96 * 0.058 = 0.069$$

Entonces $0.069 \leq \beta_{52} \leq 0.297$

- **LeaderSh (Y₂) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta

$$\text{Ruta 1: LeaderSh} - \text{SupporOp} - \text{SPImprov} = 0.322 * 0.650 = 0.209$$

$$Y_{62} = \beta_{52} * \beta_{65} * Y_2 \quad (21)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.009$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.209 + 1.96 * 0.009 = 0.227$$

$$LI = 0.209 - 1.96 * 0.009 = 0.191$$

Entonces $0.191 \leq \beta_{62} \leq 0.227$

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por tres rutas

$$\text{Ruta 1: LeaderSh} - \text{SPImprov} - \text{ProImpr} = 0.159 * 0.323 = 0.051$$

$$\text{Ruta 2: LeaderSh} - \text{TeamWork} - \text{ProImpr} = 0.324 * 0.272 = 0.088$$

$$\text{Ruta 3: LeaderSh} - \text{SupporOp} - \text{ProImpr} = 0.322 * 0.387 = 0.125$$

Efecto debido a las tres rutas es de: 0.264

$$Y_{72} = \beta_{62} * \beta_{76} * Y_2 + \beta_{32} * \beta_{73} * Y_2 + \beta_{52} * \beta_{75} * Y_2 \quad (22)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.067$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.264 + 1.96 * 0.067 = 0.395$$

$$LI = 0.264 - 1.96 * 0.067 = 0.133$$

Entonces $0.133 \leq \beta_{72} \leq 0.395$

4.6.1.3 Influencia del Trabajo en Equipo – TeamWork (Y₃)

El TeamWork tiene influencia en un factor en SupporOp, el cual es muy influyente desde los procesos de soporte de la organización en la producción. Esta influencia se refleja en dos rutas.

- **TeamWork (Y₃) a SupporOp (Y₅):**

$$\text{Ruta 1: TeamWork} - \text{WorkEnv} - \text{SupporOp} = 0.295 * 0.390 = 0.115$$

$$Y_{53} = \beta_{43} * \beta_{54} * Y_3 \quad (23)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.047$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.115 + 1.96 * 0.047 = 0.207$$

$$LI = 0.115 - 1.96 * 0.047 = 0.023$$

Entonces $0.023 \leq \beta_{53} \leq 0.207$

4.6.1.4 Influencia del Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y4)

El factor WorkEnv tiene influencia por dos segmentos en dos factores: SPImprov y ProImpr. El efecto del ambiente de trabajo es importante en para el desarrollo de estos dos factores, los cuales son los responsables de la eficiencia de la producción.

- **WorkEnv (Y4) a SPImprov(Y6):**

$$\text{Ruta 1: WorkEnv} - \text{SupporOp} - \text{SPImprov} = 0.390 * 0.65 = 0.254$$

$$Y_{64} = \beta_{54} * \beta_{65} * Y_4 \quad (24)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.071$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.254 + 1.96 * 0.071 = 0.393$$

$$LI = 0.254 - 1.96 * 0.071 = 0.115$$

Entonces $0.115 \leq \beta_{64} \leq 0.393$

- **WorkEnv (Y4) a ProImpr(Y7):**

$$\text{Ruta 1: WorkEnv} - \text{SupporOp} - \text{ProImpr} = 0.390 * 0.387 = 0.151$$

$$Y_{74} = \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 \quad (25)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.059$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.151 + 1.96 * 0.059 = 0.267$$

$$LI = 0.151 - 1.96 * 0.059 = 0.035$$

Entonces $0.035 \leq \beta_{74} \leq 0.267$

4.6.1.5 Influencia del Soporte Operativo – SupporOp (Y5)

El SupporOp influye indirectamente en ProImpr a través de SPImprov. Es el mejoramiento del sistema de producción con una alta influencia de los procesos de la organización que soportan la producción. Esta influencia se lleva a cabo por una ruta de dos segmentos.

- **SupporOp (Y5) a ProImpr (Y7):**

$$\text{Ruta 1: SupporOp} - \text{SPImprov} - \text{ProImpr} = 0.650 * 0.323 = 0.210$$

$$Y_{75} = \beta_{65} * \beta_{76} * Y_5 \quad (26)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.054$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.210 + 1.96 * 0.054 = 0.316$$

$$LI = 0.210 - 1.96 * 0.054 = 0.104$$

Entonces $0.104 \leq \beta_{75} \leq 0.316$

Tabla A4.5A.2. Efectos indirectos de dos segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork			0.181				
WorkEnv			0.410		0.096		
CommTM							
SupporOp	0.115		0.179		0.183		
LeaderSh							
SPImprov		0.254	0.561		0.209		
ProImpr		0.151	0.419	0.210	0.264		

Tabla A4.5.A.3 Valores P para los efectos indirectos de dos segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIimprov	ProImpr
TeamWork			0.006				
WorkEnv			<0.001		0.007		
CommTM							
SupporOp	0.008		0.011		0.001		
LeaderSh							
SPIimprov		<0.001	<0.001		0.009		
ProImpr		0.006	<0.001	<0.001	<0.001		

Tabla A4.5A.4. Errores estándar para efectos indirectos de dos segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIimprov	ProImpr
TeamWork			0.070				
WorkEnv			0.097		0.039		
CommTM							
SupporOp	0.047		0.078		0.058		
LeaderSh							
SPIimprov		0.071	0.085		0.009		
ProImpr		0.059	0.091	0.054	0.067		

4.6.1.6 Tamaño de los efectos indirectos para dos segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su

efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. Ver Tabla A4.5A.5.

- **Efecto en Liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)**

LeaderSh no recibe efectos indirectos solo recibe efectos directos como se presentó anteriormente.

- **Efecto en Trabajo en Equipo – TeamWork (Y₃)**

TeamWork recibe efecto de CommTM, su tamaño es de 0.123 que es un efecto pequeño sin embargo muestra su influencia indirecta en TeamWork. $R^2 = 0.123$

- **Efecto en Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y₄)**

WorkEnv recibe efecto de CommTM 0.207 que es un efecto mediano y LeaderSh 0.062 un efecto pequeño, siendo más importante la influencia de CommTM en el WorkEnv. Sin embargo, el efecto combinado es de $R^2 = 0.269$ que configura un efecto mediano.

- **Efecto en Soporte Operativo – SupporOp (Y₅)**

SupporOp recibe efectos de TeamWork 0.053 que es un efecto pequeño, de CommTM 0.135 también un efecto pequeño y de LeaderSh 0.067 un efecto pequeño. La suma de los efectos es de $R^2 = 0.255$ que corresponde a un efecto mediano. Son estos tres factores en conjunto que influyen en SupporOp con dos segmentos, lo que quiere decir que los factores mediadores en cada uno de los casos son importantes de manera conjunta para el efecto en este factor.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y₆)**

SPImprov recibe efecto pequeño de TeamWork 0.090, Un efecto mediano de CommTM de 0.334 y uno pequeño de LeaderSh 0.082, sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.506$ que es un efecto grande de estos factores. Un efecto que es casi del mismo tamaño que el efecto directo que recibe de 0.522 que recibe de SupporOp y LeaderSh que se explicó en el aparte del análisis del tamaño de los efectos directos.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de WorkEnv 0.089, un efecto mediano de CommTM 0.317, un efecto mediano de SupporOp 0.16 y un efecto pequeño de 0.145 de LeaderSh, aunque este último está muy cercano al límite de efecto grande no debe ser subestimado, ya que estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.711$, un efecto mayor al efecto directo de los factores de los que recibe influencia.

Tabla A4.5A.5. Tamaño de los efectos indirectos de dos segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr	Efecto 2 Seg
TeamWork			0.123					0.123
WorkEnv			0.207		0.062			0.269
CommTM								
SupporOp	0.053		0.135		0.067			0.255
LeaderSh								
SPImprov		0.090	0.334		0.082			0.506
ProImpr		0.089	0.317	0.160	0.145			0.711

4.6.2 Efectos indirectos para rutas de tres segmentos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de tres FM exógenos ubicados tres segmentos atrás de él. Se identifica el total de rutas de tres segmentos. Tabla A4.5A.6.

TablaA4.5A.6. Numero de Pasos con tres segmentos

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv			1				
CommTM							
SupporOp			2		1		
LeaderSh							
SPImprov	1		1		1		
ProImpr	1	1	4		2		

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5A.7 a continuación, Los Valores P con los cuales se valida la relación en la Tabla A4.5A.8 y Los errores con los que se calculan los intervalos de confianza en la Tabla A4.5A.9.

4.6.2.1 Influencia del Compromiso de la Alta Gerencia - CommTM (Y1)

Con rutas de tres segmentos, este factor tiene influencia en WorkEnv, SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y1) a WorkEnv (Y4):** este efecto se presenta por una ruta de tres segmentos.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh - TeamWork – WorkEnv = $0.558 * 0.324 * 0.295 = 0.053$

Efecto debido a esta ruta es de: 0.053

$$Y_{41} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * Y_1 \quad (26)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.025$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.053 + 1.96 * 0.025 = 0.102$$

$$LI = 0.053 - 1.96 * 0.025 = 0.004$$

Entonces $0.004 \leq \beta_{41} \leq 0.102$

- **CommTM (Y₁) a SupporOp (Y₅):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp = $0.558 * 0.468 * 0.39 = 0.102$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp = $0.506 * 0.295 * 0.39 = 0.058$

Efecto de las dos rutas de tres segmentos: $0.102 + 0.058 = 0.160$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_1 \quad (27)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.055$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.160 + 1.96 * 0.055 = 0.268$$

$$LI = 0.160 - 1.96 * 0.055 = 0.052$$

Entonces $0.052 \leq \beta_{51} \leq 0.268$

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp - SPImprov = $0.558 * 0.322 * 0.65 = 0.117$

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{65} * Y_1 \quad (28)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.051$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.117 + 1.96 * 0.051 = 0.217$$

$$LI = 0.117 - 1.96 * 0.051 = 0.017$$

Entonces $0.017 \leq \beta_{61} \leq 0.217$

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por cuatro rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SPImprov -ProImpr = $0.558 * 0.159 * 0.323 = 0.029$

Ruta 2: CommTM – LeaderSh – SupporOp -ProImpr = $0.558 * 0.322 * 0.387 = 0.070$

Ruta 3: CommTM – LeaderSh – TeamWork – ProImpr = $0.506 * 0.327 * 0.272 = 0.049$

Ruta 4: CommTM – SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.726 * 0.650 * 0.323 = 0.152$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.299

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{62} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{32} * \beta_{73} * Y_1 + \beta_{51} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (29) \quad \beta_{21}$$

El error para esta relación, $\delta = 0.064$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.299 + 1.96 * 0.064 = 0.424$$

$$LI = 0.299 - 1.96 * 0.064 = 0.174$$

Entonces $0.174 \leq \beta_{71} \leq 0.424$

4.6.2.2 Influencia del Liderazgo Lean – LeaderSh (Y2)

El Factor LeaderSh tiene influencia por tres segmentos en tres factores: SupporOp, SPImprov y ProImpr.

- **LeaderSh (Y2) a SupporOp (Y5):** este efecto se presenta por una ruta

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp = $0.324 * 0.295 * 0.390 = 0.037$

$$Y_{52} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_2 \quad (30)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.018$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.037 + 1.96 * 0.018 = 0.072$$

$$LI = 0.037 - 1.96 * 0.018 = 0.00172$$

Entonces $0.00172 \leq \beta_{52} \leq 0.072$

- **LeaderSh (Y2) a SPImprov (Y6):** este efecto se presenta por una ruta

Ruta 1: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp – SPImprov = $0.468 * 0.39 * 0.650 = 0.119$

$$Y_{62} = \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_2 \quad (31)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.040$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.119 + 1.96 * 0.040 = 0.197$$

$$LI = 0.119 - 1.96 * 0.040 = 0.041$$

Entonces $0.041 \leq \beta_{62} \leq 0.197$

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por dos rutas

Ruta 1: LeaderSh – SupporOp - SPIImprov – ProImpr = $0.322 * 0.65 * 0.323 = 0.068$

Ruta 2: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp– ProImpr = $0.468 * 0.390 * 0.387 = 0.071$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.138

$$Y_{72} = \beta_{52} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 + \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 \quad (32)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.047$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.138 + 1.96 * 0.047 = 0.230$$

$$LI = 0.138 - 1.96 * 0.047 = 0.045$$

Entonces $0.045 \leq \beta_{72} \leq 0.230$

4.6.2.3 Influencia del Trabajo en Equipo – TeamWork (Y₃)

El TeamWork tiene influencia en un factor en SPIImprov y ProImpr.

- **TeamWork (Y₃) a SPIImprov (Y₆):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPIImprov = $0.295 * 0.390 * 0.65 = 0.075$

$$Y_{63} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_3 \quad (33)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.032$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.075 + 1.96 * 0.032 = 0.138$$

$$LI = 0.075 - 1.96 * 0.032 = 0.012$$

Entonces $0.012 \leq \beta_{63} \leq 0.138$

- **TeamWork (Y₃) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – ProImpr = $0.295 * 0.390 * 0.387 = 0.045$

$$Y_{73} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_3 \quad (34)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.022$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.045 + 1.96 * 0.022 = 0.088$$

$$LI = 0.045 - 1.96 * 0.022 = 0.00188$$

Entonces $0.00188 \leq \beta_{73} \leq 0.088$

4.6.2.4 Influencia del Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y₄)

El factor WorkEnv tiene influencia en ProImpr.

- **WorkEnv (Y₄) a ProImpr(Y₇):**

Ruta 1: WorkEnv – SupporOp – SPImprov - ProImpr = $0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.082$

$$Y_{74} = \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_4 \quad (35)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.030$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.082 + 1.96 * 0.030 = 0.141$$

$$LI = 0.082 - 1.96 * 0.030 = 0.023$$

Entonces $0.023 \leq \beta_{74} \leq 0.141$

Tabla A4.5A.7. Efectos indirectos de tres segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv			0.053				
CommTM							
SupporOp			0.160		0.037		
LeaderSh							
SPIImprov	0.075		0.117		0.199		
ProImpr	0.045	0.082	0.299		0.138		

Tabla A4.5A.8. Valores P para los efectos indirectos de tres segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv			0.019				
CommTM							
SupporOp			0.002		0.022		
LeaderSh							
SPIImprov	0.010		0.012		0.002		
ProImpr	0.023	0.003	<0.001		0.002		

Tabla A4.5ª.9. Errores estándar para efectos indirectos de tres segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv			0.025				
CommTM							
SupporOp			0.055		0.018		
LeaderSh							
SPImprov	0.032		0.051		0.040		
ProImpr	0.0232	0.030	0.064		0.047		

4.6.2.5 Tamaño de los efectos indirectos para tres segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influyen directamente como se verá a continuación. En tres rutas no hay efectos en TeamWork y LeaderSh. Tabla A4.5A.10.

- **Efecto en Liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)**

LeaderSh no recibe efectos indirectos solo recibe efectos directos como se presentó anteriormente.

- **Efecto en Ambiente de Trabajo – WorkEnv (Y₄)**

WorkEnv recibe efecto de CommTM 0.027 que es un efecto pequeño. El efecto para tres segmentos es de $R^2 = 0.027$.

- **Efecto en Soporte Operativo – SupporOp (Y₅)**

SupporOp recibe efectos de CommTM 0.121 que es un efecto pequeño y de LeaderSh 0.014 también un efecto pequeño. La suma de los efectos es de $R^2 = 0.135$ que corresponde a un efecto pequeño.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y₆)**

SPImprov recibe efecto pequeño de TeamWork 0.026, Un efecto pequeño de CommTM de 0.070 y uno pequeño de LeaderSh 0.047, sin embargo los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.143$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de TeamWork de 0.028, WorkEnv 0.048, un efecto mediano de CommTM 0.227 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.076. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.379$, un efecto grande.

Tabla A4.5A.10. Tamaño de los efectos indirectos de tres segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr	Efecto 3 Seg
TeamWork								
WorkEnv			0.027					0.027
CommTM								
SupporOp			0.121		0.014			0.135
LeaderSh								
SPImprov	0.026		0.070		0.047			0.143
ProImpr	0.028	0.048	0.227		0.076			0.379

4.6.3 Efectos indirectos para rutas de cuatro segmentos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de tres FM exógenos ubicados tres segmentos atrás de él. Se identifica el total de rutas de tres segmentos. Tabla A4.5A.11.

Tabla A4.5A.11. Numero de Pasos con cuatro segmentos

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp			1				
LeaderSh							
SPImprov			2		1		
ProImpr	1		3		2		

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla 12 a continuación, Los Valores P con los cuales se valida la relación en la Tabla 13 y Los errores con los que se calculan los intervalos de confianza en la Tabla A4.5A.14.

4.6.3.1 Influencia del Compromiso de la Alta Gerencia - CommTM (Y1)

Con rutas de cuatro segmentos, este factor tiene influencia en SupporOp, SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y1) a SupporOp (Y5):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp = $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.39 = 0.021$

$$Y_{51} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * Y_1 \quad (36)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.012$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.021 + 1.96 * 0.012 = 0.045$$

$$LI = 0.021 - 1.96 * 0.012 = -0.00252$$

Entonces $-0.00252 \leq \beta_{51} \leq 0.045$

Esta relación se considera NO válida.

- **CommTM (Y₁) a SPImprov (Y₆):** este efecto se presenta por dos rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp - SPImprov = $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.65 = 0.066$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv – SupporOp - SPImprov = $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.65 = 0.038$

El efecto combinado de las dos rutas es 0.104

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 \quad (37)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.038$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.104 + 1.96 * 0.038 = 0.178$$

$$LI = 0.104 - 1.96 * 0.038 = 0.0295$$

Entonces $0.0295 \leq \beta_{61} \leq 0.178$

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – SupporOp - SPImprov - ProImpr = $0.558 * 0.322 * 0.65 * 0.323 = 0.038$

Ruta 2: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp -ProImpr = $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.387 = 0.023$

Ruta 3: CommTM – LeaderSh – WorkEnv - SupporOp – ProImpr = $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.387 = 0.039$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.100

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{52} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 \quad (38)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.036$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.100 + 1.96 * 0.036 = 0.171$$

$$LI = 0.100 - 1.96 * 0.036 = 0.029$$

Entonces $0.029 \leq \beta_{71} \leq 0.171$

4.6.3.2 Influencia del Liderazgo Lean – LeaderSh (Y2)

El Factor LeaderSh tiene influencia por cuatro segmentos en dos factores: SPImprov y ProImpr.

- **LeaderSh (Y2) a SPImprov (Y6):** este efecto se presenta por una ruta

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp – SPImprov = $0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.650 = 0.024$

$$Y_{62} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_2 \quad (39)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.012$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.024 + 1.96 * 0.012 = 0.0478$$

$$LI = 0.024 - 1.96 * 0.012 = 0.00048$$

Entonces $0.00048 \leq \beta_{62} \leq 0.0475$

- **LeaderSh (Y2) a ProImpr (Y7):** este efecto se presenta por dos rutas

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp - ProImpr = $0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.387 = 0.068$

Ruta 2: LeaderSh – WorkEnv - SupporOp– SPImprov - ProImpr = $0.468 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.014$

Efecto debido a las dos rutas es de: 0.053

$$Y_{72} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_2 + \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 \quad (40)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.017$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.053 + 1.96 * 0.017 = 0.086$$

$$LI = 0.053 - 1.96 * 0.017 = 0.0197$$

Entonces $0.0197 \leq \beta_{72} \leq 0.086$

4.6.3.3 Influencia del Trabajo en Equipo – TeamWork (Y3)

El TeamWork tiene influencia en el factor en ProImpr.

- **TeamWork (Y3) a ProImpr (Y7):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: TeamWork – WorkEnv – SupporOp – SPIImprov - ProImpr = $0.295 * 0.390 * 0.65 * 0.323$
= 0.024

$$Y_{73} = \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_3 \quad (41)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.012$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.024 + 1.96 * 0.012 = 0.0475$$

$$LI = 0.024 - 1.96 * 0.012 = 0.00048$$

Entonces $0.00048 \leq \beta_{73} \leq 0.0475$

Tabla A4.5A.12. Efectos indirectos de cuatro segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp			0.021				
LeaderSh							
SPIImprov			0.104		0.024		
ProImpr	0.024		0.100		0.053		

Tabla A4.5A.13. Valores P para los efectos indirectos de cuatro segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp			0.040				
LeaderSh							
SPImprov			0.004		0.021		
ProImpr	0.025		0.003		0.002		

Tabla A.4.5A.14. Errores estándar para efectos indirectos de cuatro segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp			0.012				
LeaderSh							
SPImprov			0.038		0.012		
ProImpr	0.012		0.036		0.017		

4.6.3.4 Tamaño de los efectos indirectos para cuatro segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes.

Llamando la atención el efecto indirecto sobre SPImprov casi tan grande como el efecto directo y el efecto indirecto sobre ProImpr que es más grande que el efecto debido a los factores que lo influncian directamente como se verá a continuación. En tres rutas no hay efectos en TeamWork y LeaderSh. Tabla A.4.5A.15.

- **Efecto en Soporte Operativo – SupporOp (Y₅)**

SupporOp recibe un efecto pequeño de CommTM 0.016. $R^2 = 0.016$.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y₆)**

SPImprov recibe efecto pequeño de CommTM de 0.062 y uno pequeño de LeaderSh 0.010, sin embargo, los efectos combinados suman un efecto de $R^2 = 0.072$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de TeamWork de 0.015, un efecto pequeño de CommTM 0.076 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.029. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia conjunta sobre la producción de un $R^2 = 0.120$, un efecto pequeño.

Tabla A4.5A.15. Tamaño de los efectos indirectos de cuatro segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr	Efecto 4 Seg
TeamWork								
WorkEnv								
CommTM								
SupporOp			0.016					0.016
LeaderSh								
SPImprov			0.062		0.010			0.072
ProImpr	0.015		0.076		0.029			0.120

4.6.4 Efectos indirectos para rutas de cinco segmentos

Este análisis detalla la relación causal en un factor endógeno a causa de tres FM exógenos ubicados tres segmentos atrás de él. Se identifica el total de rutas de tres segmentos. Tabla A4.5A.16.

Tabla A4.5A.16. Numero de Pasos con cinco segmentos

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov			1				
ProImpr			3		1		

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla 17 a continuación, Los Valores P con los cuales se valida la relación en la Tabla A4.5A.18 y Los errores con los que se calculan los intervalos de confianza en la Tabla A4.5A.19.

4.6.4.1 Influencia del Compromiso de la Alta Gerencia - CommTM (Y1)

Con rutas de cinco segmentos, este factor tiene influencia en SPImprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y1) a SPImprov (Y6):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork - WorkEnv - SupporOp - SPImprov = $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.65 = 0.014$

$$Y_{61} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * Y_1 \quad (42)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.008$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.014 + 1.96 * 0.008 = 0.0296$$

$$LI = 0.014 - 1.96 * 0.008 = -0.00168$$

Esta relación se considera NO válida.

- **CommTM (Y₁) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por tres rutas.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv - SupporOp - ProImpr = $0.558 * 0.324 * 0.295 * 0.390 * 0.387 = 0.008$

Ruta 2: CommTM – LeaderSh - WorkEnv - SupporOp – SPIImprov - ProImpr = $0.558 * 0.468 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.021$

Ruta 3: CommTM – TeamWork – WorkEnv - SupporOp – SPIImprov - ProImpr = $0.506 * 0.295 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.012$

Efecto total debido a las cuatro rutas: 0.042

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{75} * Y_1 + \beta_{21} * \beta_{42} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} Y_1 + \beta_{31} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} Y_1 \quad (43)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.017$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.042 + 1.96 * 0.017 = 0.075$$

$$LI = 0.042 - 1.96 * 0.017 = 0.00868$$

Entonces $0.0868 \leq \beta_{71} \leq 0.075$

4.6.4.2 Influencia del Liderazgo Lean – LeaderSh (Y₂)

El Factor LeaderSh tiene influencia por cinco segmentos en un factor: ProImpr.

- **LeaderSh (Y₂) a ProImpr (Y₇):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: LeaderSh – TeamWork - WorkEnv – SupporOp – SPIImprov - ProImpr = $0.324 * 0.295 * 0.39 * 0.650 * 0.323 = 0.008$

$$Y_{72} = \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_2 \quad (44)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.004$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.008 + 1.96 * 0.004 = 0.0158$$

$$LI = 0.008 - 1.96 * 0.004 = 0.00016$$

Entonces $0.00016 \leq \beta_{72} \leq 0.0158$

Tabla A4.5A.17. Efectos indirectos de cinco segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPIImprov			0.140				
ProImpr			0.042		0.008		

Tabla A4.5A.18. Valores P para los efectos indirectos de cinco segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov			0.038				
ProImpr			0.007		0.034		

Tabla A4.5A.19. Errores estándar para efectos indirectos de cinco segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov			0.008				
ProImpr			0.017		0.004		

4.6.4.3 Tamaño de los efectos indirectos para cinco segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su

efecto. En este análisis identifican efectos indirectos conjuntos pequeños, medianos y grandes. Tabla A4.5A.20.

- **Efecto en Mejoramiento del Sistema de Producción – SPImprov (Y₆)**

SPImprov recibe efecto pequeño de CommTM de 0.008. $R^2 = 0.088$ que es un efecto pequeño de estos factores.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de CommTM 0.017 y un efecto pequeño de LeaderSh 0.004. Estos factores de manera indirecta ejercen una influencia pequeña sobre la producción de un $R^2 = 0.036$, un efecto pequeño.

Tabla A4.5A.20. Tamaño de los efectos indirectos de cinco segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr	Efecto 5 Seg
TeamWork								
WorkEnv								
CommTM								
SupporOp								
LeaderSh								
SPImprov			0.008					0.008
ProImpr			0.032		0.004			0.036

4.6.5 Efectos indirectos para rutas de seis segmentos

Solo se dispone de una ruta con seis segmentos. Tabla A4.5A.21.

Tabla A4.5A.21. Numero de Pasos con seis segmentos

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIimprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPIimprov							
ProImpr			1				

Para cada ruta de tres segmentos se revisan los efectos considerando la información mostrada en la Tabla A4.5A.22 a continuación, Los Valores P con los cuales se valida la relación en la Tabla A4.5A.23 y Los errores con los que se calculan los intervalos de confianza en la Tabla A4.5A.24.

4.3.1.1.1 Influencia del Compromiso de la Alta Gerencia - CommTM (Y1)

Con rutas de cinco segmentos, este factor tiene influencia en SPIimprov y ProImpr. En este aparte se analiza el efecto de CommTM en el factor de madurez que lo recibe. Más adelante se analiza también el tamaño de los efectos en cada factor endógeno.

El efecto de cada una de las rutas se calcula al multiplicar los efectos directos presentes en las rutas, así:

- **CommTM (Y1) a ProImpr (Y7):** este efecto se presenta por una ruta.

Ruta 1: CommTM – LeaderSh – TeamWork – WorkEnv - SupporOp – SPIimprov - ProImpr = 0.558
 $* 0.324 * 0.295 * 0.390 * 0.65 * 0.323 = 0.004$

$$Y_{71} = \beta_{21} * \beta_{32} * \beta_{43} * \beta_{54} * \beta_{65} * \beta_{76} * Y_1 \quad (43)$$

El error para esta relación, $\delta = 0.003$, el intervalo de confianza para la relación es:

$$LS = 0.004 + 1.96 * 0.003 = 0.00988$$

$$LI = 0.004 - 1.96 * 0.003 = -0.00188$$

Esta relación se considera NO válida.

Tabla A4.5A.22. Efectos indirectos de seis segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPImprov	ProImpr
TeamWork							
WorkEnv							
CommTM							
SupporOp							
LeaderSh							
SPImprov							
ProImpr			0.004				

Tabla A4.5A.23. Valores P para los efectos indirectos de seis segmentos.

TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIimprov	ProImpr
TeamWork						
WorkEnv						
CommTM						
SupporOp						
LeaderSh						
SPIimprov						
ProImpr		0.063				

Tabla A4.5A.24. Errores estándar para efectos indirectos de seis segmentos.

TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIimprov	ProImpr
TeamWork						
WorkEnv						
CommTM						
SupporOp						
LeaderSh						
SPIimprov						
ProImpr		0.003				

4.3.1.1.2 Tamaño de los efectos indirectos para seis segmentos

El tamaño de los efectos corresponde al efecto que producen los factores exógenos en el factor endógeno, por la o las rutas por las que influye dicho factor y por los otros factores que suman su efecto. En este análisis identifican efectos indirectos ver Tabla A4.5A.25.

- **Efecto en Mejoramiento de la Producción – ProImpr (Y₇)**

ProImpr recibe un efecto pequeño de CommTM 0.003. Este factor de manera indirecta ejerce una influencia pequeña sobre la producción de un $R^2 = 0.003$, un efecto pequeño.

Tabla A4.5A.25. Tamaño de los efectos indirectos de seis segmentos.

	TeamWork	WorkEnv	CommTM	SupporOp	LeaderSh	SPIImprov	ProImpr	Efecto 6 Seg
ProImpr			0.003					0.003

Anexo 5.1

Modelo estadístico para la obtención del índice de madurez

La madurez en el proceso de producción de proyectos de construcción corresponde a un concepto que no se puede medir directamente desde el punto de vista metodológico, de modo que como característica medible puede ser evaluada a través de una variable latente que se aproxima como una variable sintética. De acuerdo con Silva (1997) una variable sintética es una función de un conjunto de variables intermedias cada una de las cuales contribuye a cuantificar algún rasgo del concepto cuya magnitud quiere sintetizarse.

La expresión numérica de la madurez en la gestión de producción de proyectos de construcción (GPC) puede ser modelada mediante una escala construida a partir de la medición de Siete (7) variables latentes o factores de madurez (FM) que son medidos a través de una serie de variables observadas o atributos, estos son:

- Compromiso de la Alta Dirección,
- Liderazgo lean,
- Trabajo en equipo,
- Ambiente de trabajo,
- Soporte operativo a la producción,
- Mejoramiento del sistema de producción y
- Mejoramiento de la producción.

Sea la variable aleatoria Z , la expresión del nivel de madurez de un proceso de gestión, la cual puede tomar valores entre 1 y 5, donde 1 representa un valor mínimo de madurez y el 5 un valor máximo. Dado el carácter aleatorio de esta variable, es posible asignar una distribución de probabilidad $G_Z(z)$ a su comportamiento natural, la cual resulta desconocida e indexada para un conjunto de parámetros $\vec{\tau}$.

De acuerdo a la medición en cada uno de los siete FM, la variable Z se expresa en términos de cada una de éstos y su peso respectivo, es decir, $G_Z^{-1}(z) = \sum_{j=1}^7 \theta_j y_j$ donde θ_j indica la importancia que tiene el j -ésimo factor sobre el nivel de madurez del proceso de gestión de la empresa tal que $\theta_j \in (0,1)$ y $\sum_{j=1}^7 \theta_j = 1$; y $G_Z^{-1}(z)$ es un percentil de la distribución Z que refleje el nivel de madurez asociado a la medición en los siete factores.

De igual manera, al comportamiento de cada FM Y se asocia una distribución de probabilidad $H_Y(y)$, expresada en términos de la respuesta a cada uno de sus correspondientes Atributos y sus pesos o Cargas Factoriales, $H_Y^{-1}(y) = \sum_{i=1}^{k_j} \omega_{ij} x_{ij}$, donde ω_{ij} indica la importancia que tiene el i -ésimo Atributo sobre la medición del nivel de su respectivo factor j ; y $H_Y^{-1}(y)$ es un percentil de la distribución Y_j que refleja el nivel del factor asociado a la medición de sus k_j Atributos. A cada Atributo x_{ij} es posible asociarle una distribución de probabilidad tal que la respuesta a través de una escala ordinal tome valores entre 1 y 5 los cuales reflejan el nivel que presenta el Atributo j en la evaluación de madurez.

5.1.1 Validación del Índice de Madurez

Propuesta de índices

Para la validación del Índice de Madurez de LC en GPC, se propusieron diferentes opciones de indicadores con el fin de escoger aquel que mejor se aproximara a este concepto con el menor error posible. Esto se realiza teniendo en cuenta la contribución de cada Atributo a su FM. Las relaciones existentes entre FM y la contribución de cada FM en la medición del IGM.

Inicialmente se propusieron dos (2) tipos de índices (1) y (2):

$$I_1 = \sum_{j=1}^7 Y_j \quad (1)$$

$$I_2 = \sum_{j=1}^7 \pi_j * Y_j \quad (2)$$

El índice I_1 planteó la estimación del nivel de madurez mediante la sumatoria de la medición en los siete FM (Y_j). En el índice I_2 , la estimación del nivel de madurez se propuso a través de la sumatoria de los productos entre las ponderaciones de los FM (π_j), por su respectiva medición Y_j .

Para los índices I_1 e I_2 se definieron seis opciones para estimar el valor de Y_j (Tabla A5.1).

- En la primera opción, Y_j se estimó considerando la contribución de los k_j Atributos a su respectivo factor j . El cálculo se expresó mediante la sumatoria del producto entre los pesos

del Atributo i del factor j (λ_{ij}) por la respuesta al Atributo x_{ij} . En este caso, λ_{ij} cumple las características de que $\lambda_{ij} \in R$ y $\sum_{i=1}^{k_j} \lambda_{ij} > 0$.

- En la segunda opción, la expresión para el cálculo de Y_j fue similar a la opción anterior, pero se transformó los pesos de los Atributos λ_{ij} en $\alpha_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^{k_j} \lambda_{ij}}$, de tal manera que por factor se obtuviera que $\sum_{i=1}^{k_j} \alpha_{ij} = 1$.
- En la tercera opción la estimación de Y_j se realizó mediante las t_j -ésimas correlaciones (β) existentes entre el factor j y los demás factores. El cálculo se realizó mediante la sumatoria del producto entre la l -ésima correlación existente entre el factor j y el factor m (β_l) por la medición en el factor m (y_l). El valor de y_l se calculó por medio de la opción 1. Las correlaciones (β_l) cumplen con la característica de que $\sum_{l=1}^{t_j} \beta_l > 0$.
- En la cuarta opción, la expresión para estimar Y_j es similar a la opción 3, pero se realizó una transformación a las correlaciones entre factores β_l en $\alpha_l^* = \frac{\beta_l}{\sum_{l=1}^{t_j} \beta_l}$, de tal manera que por factor se tuviera que $\sum_{l=1}^{t_j} \alpha_l^* = 1$.
- En la quinta opción, se realizó la medición de Y_j teniendo en cuenta tanto la contribución de los k_j Atributos a su respectivo factor j como las t_j -ésimas relaciones existentes entre el factor j y los demás factores. El cálculo se expresó mediante la suma de dos componentes: el primer componente contiene la contribución de los Atributos al respectivo factor, y fue estimado mediante la opción 1; el segundo componente contiene las relaciones existentes entre el factor j con los demás factores, y fue calculado mediante la opción 3.
- La sexta opción es similar a la opción 5, pero se utilizaron las transformaciones α_{ij} y α_l^* para reemplazar a λ_{ij} y β_l , respectivamente.

Tabla A5.1. Opciones propuestas para el cálculo de Y_j

Opción.	Y_j	Descripción de variables
1	$Y_j = \sum_{i=1}^{k_j} \lambda_{ij} * x_{ij}$	$i = 1, \dots, k_j$ $j = 1, \dots, 7$
2	$Y_j = \sum_{i=1}^{k_j} \alpha_{ij} * x_{ij}$	$\lambda_{ij} \in R$ $\sum_{i=1}^{k_j} \lambda_{ij} > 0$
3	$Y_j = \sum_{l=1}^{t_j} \beta_l * y_l$	$\alpha_{ij} = \frac{\lambda_{ij}}{\sum_{i=1}^{k_j} \lambda_{ij}}$ $\alpha_{ij} \in (0,1)$
4	$Y_j = \sum_{l=1}^{t_j} \alpha_l^* * y_l$	$\sum_{i=1}^{k_j} \alpha_{ij} = 1$
5	$Y_j = \sum_{i=1}^{k_j} \lambda_{ij} * x_{ij} + \sum_{l=1}^{t_j} \beta_l * y_l$	$\beta_l \in (0,1)$ $\sum_{l=1}^{t_j} \beta_l > 0$
6	$Y_j = \sum_{i=1}^{k_j} \alpha_{ij} * x_{ij} + \sum_{l=1}^{t_j} \alpha_l^* * y_l$	$y_l = \sum_{i=1}^{k_j} \lambda_{ij} * x_{ij}$

		$\alpha_l^* = \frac{\beta_l}{\sum_{l=1}^{t_j} \beta_l}$ $\sum_{l=1}^{t_j} \alpha_l^* = 1$ $t_j \in N$
--	--	---

Los valores estimados de los pesos de los Atributos (λ_{ij}) y su transformación (α_{ij}) se encuentran en la Tabla A-1, las correlaciones estimadas entre los factores (β_l) y su transformación (α_l^*) en la Tabla A-2 y los pesos de los FM y su transformación (π_j), la cual se utiliza para el índice, se encuentra en la Tabla A-3.

De acuerdo a los dos tipos de índice I_1 e I_2 y las seis opciones de cálculo de Y_j , se propone en total 12 indicadores, de los cuales se escoge aquel que presente el menor Error Cuadrático Medio (ECM), es decir, aquel índice que presente menor variabilidad o error de sus estimaciones alrededor del parámetro poblacional o valor real del índice (Mood & A., 1970)

5.1.2 Selección del Mejor Índice de Madurez

Con el objetivo de seleccionar el índice con el menor ECM, se estima este error mediante Bootstrap (Casella & Berger, 2002), para lo cual se realiza un re-muestreo de las respuestas a los 35 Atributos por parte de los 111 expertos consultados (datos muestrales).

A continuación, se presenta en modo de algoritmo, el proceso realizado para cada uno de los 12 índices:

Algoritmo

Inicio de Bootstrap (realizar el proceso 10000 veces $r = 10000$)

1. Generar a partir de los datos muestrales, una muestra aleatoria con reemplazo de tamaño 111, con la cual se obtenga las respuestas a los 35 Atributos por parte de los 111 individuos seleccionados.

2. Obtener el valor del índice para cada uno de los 111 individuos seleccionados en la muestra.
3. Transformar el rango de los 111 valores del índice (I^+) en una escala entre 0 y 1, usando el valor mínimo y máximo estimado, de la siguiente manera:

$$I^+_{n(0-1)} = \frac{I^+_n - \min(I^+)}{\max(I^+) - \min(I^+)} \quad (3)$$

$$n = 1, \dots, 111$$

4. Transformar la escala 0-1 de los valores del índice a la escala 1-5, utilizando la ecuación (4).

$$I^+_{n(1-5)} = \frac{[I^+_{(0-1)n} - \min(I^+_{(0-1)})] * [NuevoMáx - NuevoMín]}{[\max(I^+_{(0-1)}) - \min(I^+_{(0-1)})]} + NuevoMín \quad (4)$$

En este caso para definir la escala entre 1 y 5, el *NuevoMáx* tomaría el valor de 5 y el *NuevoMín* el valor de 1.

5. Estimar el valor promedio, desviación estándar, mediana, mínimo y máximo de los 111 resultados del índice en la escala 1-5.

Fin de re-muestreo

6. Estimar el valor medio de los 10000 promedios, desviaciones estándar, mediana, mínimos y máximos generados mediante el paso 5 del Bootstrap.
7. Definir adecuadamente el parámetro poblacional del índice para la estimación del ECM, basado en la simetría de la distribución de los valores del índice generados mediante el re-muestreo. En caso de que la distribución de los valores del índice sea asimétrica, definir como parámetro poblacional el valor medio de las medianas estimado en el paso 6, de lo contrario utilizar el valor medio de los promedios calculado en ese mismo paso.
8. Calcular el ECM del índice (ecuación 5) mediante el promedio de los errores cuadráticos entre el valor del parámetro poblacional definido en el paso 7 y los 10000 promedios (en

el caso de una distribución simétrica) o las 10000 medianas (en el caso de una distribución asimétrica).

$$ECM(I)_r = E \left[(\hat{\theta}_r - \theta)^2 \right] \quad (5)$$

$$r = 1, 2, \dots, 10000$$

9. Calcular el intervalo de confianza del 95% para el ECM, mediante los percentiles $\alpha/2$ y $1 - \alpha/2$, donde α corresponde al nivel de significancia definido, en este caso 0,05.

Una vez realizada la estimación puntual y por intervalo de los ECM vía Bootstrap para los 12 índices de madurez, se compararon y se escogió aquel que presentó el menor error.

5.1.3 Estimación del Índice de Madurez

Utilizando el índice seleccionado, se realiza la estimación de su valor promedio, desviación estándar, mediana, mínimo y máximo, simulando valores para los 35 Atributos, mediante el muestreo de aceptación/rechazo (Martino & Míguez, 2011), que corresponde a una técnica utilizada para generar muestras independientes de una densidad objetivo $h(x)$. En este proceso, la muestra candidata generada mediante una distribución $f(x)$ es contrastada con la población objetivo y de acuerdo con sus similitudes se acepta o no la muestra. El algoritmo implementado para la simulación de los datos de los 35 Atributos es el siguiente:

Algoritmo

Inicio

1. Generar 10000 valores aleatorios mediante la distribución $f(x)$ que representa la respuesta al Atributo i ($i = 1, 2, \dots, 35$), denote este valor como X_i .
2. Generar 10000 valores aleatorios mediante la distribución *Uniforme* ($a = 0, b = 1$), que representa el dominio de la distribución del Atributo i ; denote este valor como Y_i
3. Aceptar los puntos (X_i, Y_i) si $Y_i \leq h(X_i) / \text{Máx}(f(X_i))$, de lo contrario rechazar

4. Si se acepta los puntos, la muestra simulada es $W_q = X_q$. Si se rechaza los puntos repetir de nuevo los pasos.

Fin

Como densidad objetivo $h(x)$ para la simulación de los valores de los Atributos, se proponen tres distribuciones continuas: la Distribución Beta Generalizada, Distribución Normal Truncada y la Distribución Uniforme. Al utilizar estas tres distribuciones se desarrolla el supuesto que el rango de la respuesta al Atributo i presenta una continuidad en los valores entre 1 y 5, sin embargo, como la respuesta del Atributo se encuentra en una escala de tipo Likert, los valores simulados se redondean hacia el número entero más cercano.

A continuación, se detallan las tres distribuciones utilizadas y la manera en cómo se obtienen sus parámetros:

- Distribución Beta Generalizada $BG(\gamma, \omega, a = 1, b = 5)$: es una distribución de probabilidad continua de cuatro parámetros γ, ω, a, b introducida por (McDonald & Xub, 1995). En el caso de los 35 Atributos, el parámetro a correspondería al valor mínimo posible del Atributo i , es decir 1, y b al valor máximo posible, esto es 5. Los parámetros de forma γ y ω , se estiman utilizando el promedio de la distribución PERT-Beta (ecuación 6), distribución introducida por (Clark, 1962), la cual es una modificación de la distribución Beta de dos parámetros, definida por los valores mínimo, más probable y máximo que una variable puede tomar (Donaldson, 1965).

$$\phi_i = \frac{a + 4 * moda(x_i) + b}{6} \quad (6)$$

De acuerdo a la propuesta de (Vose, 2000), los parámetros de la distribución Beta Generalizada se obtuvieron de la siguiente manera.

$$\gamma_i = (\phi_i - a) * \left[\frac{2 * moda(x_i) - a - b}{(moda(x_i) - \phi_i) * (b - a)} \right] \quad (7)$$

$$\omega_i = \frac{\gamma_i * (b - \phi_i)}{(\phi_i - a)} \quad (8)$$

- Distribución Normal Truncada $NT(\mu, \sigma, a = 1, b = 5)$: es una distribución de probabilidad derivada de una variable aleatoria distribuida normal al limitar su rango (Burkardt, 2014). Al igual que en la distribución Beta Generalizada, los parámetros a y b corresponden al valor mínimo y máximo posible del rango del Atributo i . En este caso, el parámetro μ se estimó mediante el valor de la mediana del Atributo en los datos muestrales, debido a la asimetría en la distribución de los datos de los Atributos; y el valor de σ mediante el rango de los datos, es decir, el valor máximo que presentó el Atributo menos el valor mínimo.
- Distribución Uniforme $U(a = 1, b = 5)$: Al proponer la distribución Uniforme en el rango de 1 a 5, se supuso que cada valor de la escala de respuesta del Atributo i , tiene la misma probabilidad de ser elegida.

Una vez generados los datos de los 35 Atributos mediante el muestreo de aceptación/rechazo con las tres distribuciones objetivo-propuestas, se realiza de nuevo el Bootstrap, y se calcula por cada base de datos el valor promedio del índice, desviación estándar, mediana, mínimo y máximo de los datos. Adicional a ello, se calcula el ECM y su intervalo de confianza del 95% usando como parámetro poblacional la mediana vía Bootstrap obtenida para el índice seleccionado.

Aquella distribución que genera el valor del índice con el menor ECM, se considera como la mejor opción para la simulación de los Atributos. El valor del Índice de madurez corresponde a la mediana de los datos, y la medición para cada factor se halla mediante el producto entre el resultado del índice y los pesos de los factores (π_j). El proceso de Bootstrap y el muestreo de aceptación/rechazo se realizan mediante el programa estadístico R.

1.1 Resultados

En la implementación del Bootstrap para estimar el ECM de los 12 índices propuestos, se observa que las distribuciones de los resultados de los índices presentan asimetría hacia la derecha (Figuras A5.1 y A5.2), por lo cual, se definió como parámetro poblacional para dicha estimación, la mediana de los datos simulados.

Respecto a los resultados del valor promedio, desviación estándar, mediana, mínimo, máximo, ECM, Intervalo de Confianza del 95% para el ECM (IC95%) y el rango del IC para los Índices de Madurez, se presentan en la Tabla A5.2. De esta tabla se puede concluir que el índice con menor ECM corresponde al I_{26} ($ECM = 0.0014, IC_{95\%} = [0,00000966; 0,01632116]$), el cual fue construido con el tipo de índice 2 y la opción 6 propuesta para el cálculo de Y_j , es decir, teniendo en cuenta los pesos de los factores, la transformación de los pesos de los Atributos por factor y la transformación de las correlaciones entre variables (ecuación 9).

$$I = \sum_{j=1}^7 \pi_j * \left(\sum_{i=1}^{k_j} \alpha_{ij} * x_{ij} + \sum_{l=1}^{t_j} \alpha_l * y_l \right) \quad (9)$$

De manera general, se observa que no existe una variación importante entre el ECM de los índices, los valores de las medianas, el valor mínimo y máximo, sin embargo, el I_{26} presenta una menor variabilidad en sus estimaciones que se ve reflejada en el rango del IC (0,0065).

Tabla A5.2. Resultados de las medidas estimadas via bootstrap para los índices propuestos

Índice	Promedio	Desv.Estand	Mediana	Mínimo	Máximo	ECM	IC95%	Rango IC
I_{11}	3,91	0,63	4	1,36	4,95	0,0039	[0,00003242 ; 0,01640306]	0,0164
I_{12}	3,93	0,62	4,01	1,35	4,95	0,0021	[0,00001342 ; 0,00874923]	0,0087
I_{13}	3,96	0,67	4,06	1,35	4,98	0,0032	[0,00005623 ; 0,02059224]	0,0205
I_{14}	3,96	0,67	4,06	1,35	4,98	0,0032	[0,00005623 ; 0,02059224]	0,0205
I_{15}	3,92	0,63	4,01	1,36	4,95	0,0027	[0,00000017 ; 0,01019366]	0,0102
I_{16}	3,93	0,63	4,01	1,35	4,96	0,0018	[0,00000846 ; 0,0119831]	0,0120
I_{21}	3,9	0,63	3,99	1,35	4,94	0,0036	[0,00019387 ; 0,01647082]	0,0163
I_{22}	3,92	0,63	4	1,35	4,95	0,0016	[0,00000133 ; 0,0089252]	0,0089
I_{23}	3,96	0,66	4,05	1,35	4,98	0,0033	[0,00000966 ; 0,01632116]	0,0163
I_{24}	3,96	0,66	4,05	1,35	4,98	0,0033	[0,00000966 ; 0,01632116]	0,0163
I_{25}	3,91	0,64	4	1,35	4,95	0,0024	[0,00008331 ; 0,01175111]	0,0117
I_{26}	3,92	0,63	4	1,35	4,95	0,0014	[0,000056 ; 0,00652862]	0,0065

Figura A5.1. Distribución de los valores calculados por los índices propuestos mediante el tipo 1 y las 6 opciones de medición de los factores.

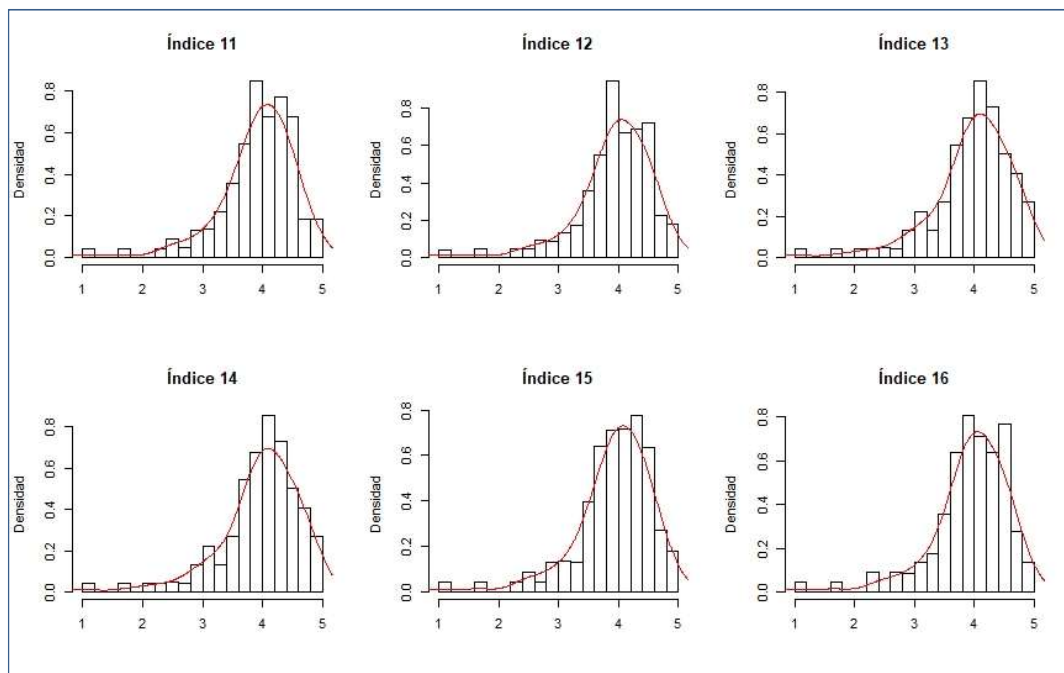
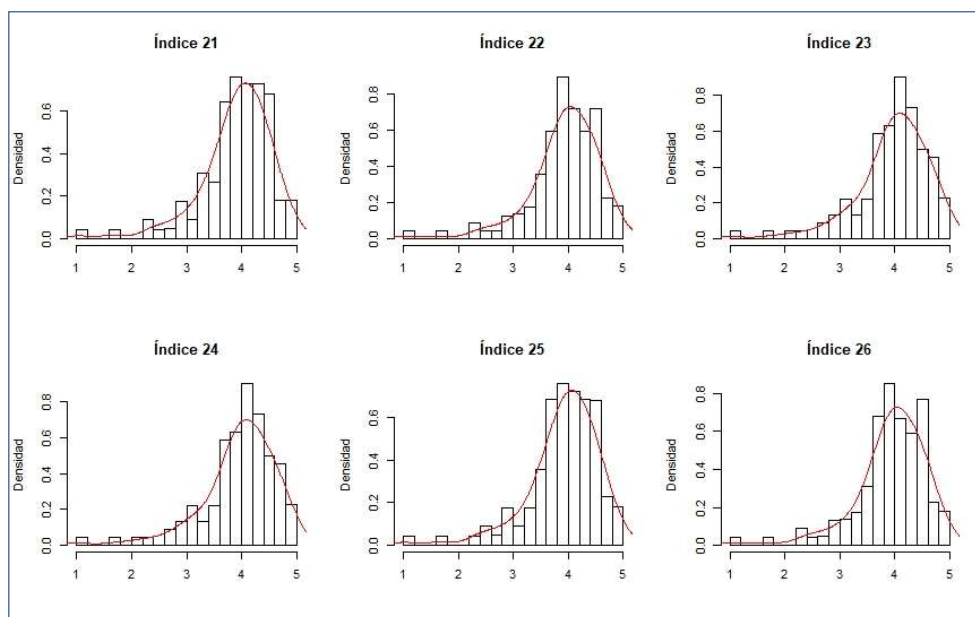


Figura A5.2. Distribución de los valores calculados por los índices propuestos de tipo 2 y las 6 opciones de medición de los factores



Como resultado de la simulación de los Atributos mediante el muestreo de aceptación/rechazo y las tres distribuciones propuestas: BG, NT y U, se calculan los valores del índice de madurez I_{26} para las 3 bases de datos generadas. La distribución de los resultados del índice para las 3 bases de datos se encuentra en la Figura A5.3, junto con la distribución del índice para los datos muestrales. En la Figura A5.3 se observa que, de las tres distribuciones utilizadas, la que ayuda a generar valores del índice más cercanos a la distribución muestral es la distribución Beta Generalizada (imagen del lado izquierdo).

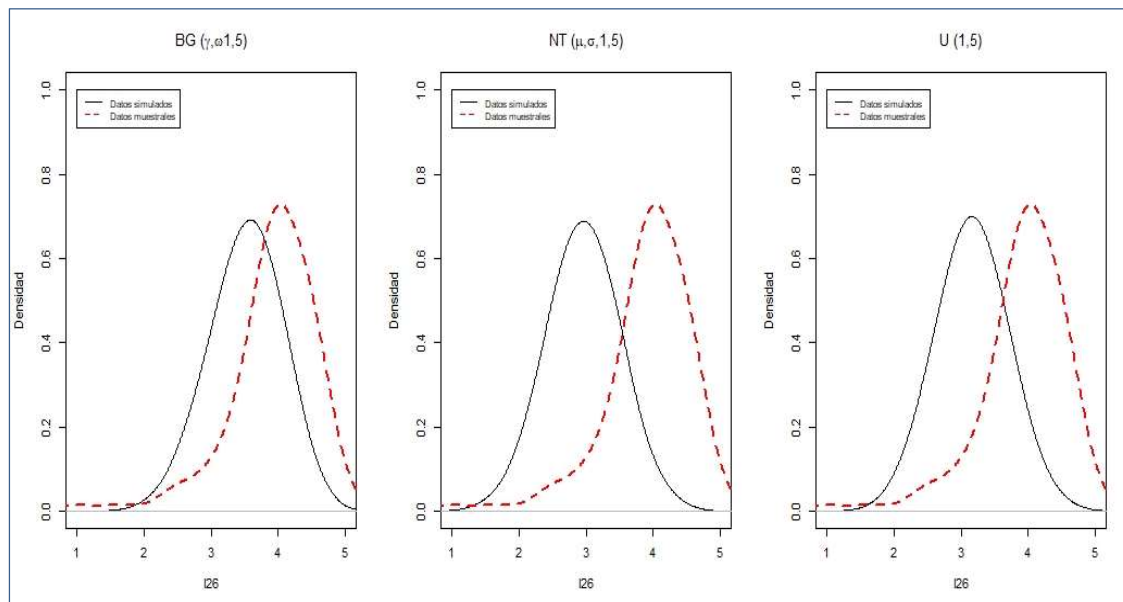


Figura A.5.3. Distribución de los valores del índice calculados para las muestras generadas mediante la distribución Beta Generalizada (BG), Normal Truncada (NT) y Uniforme (U), comparada con la distribución muestral del índice.

Al comparar los ECM de la mediana de las distribuciones simuladas con la de la distribución muestral (Tabla 3), se obtiene que la distribución de los índices asociada a la distribución Beta Generalizada presenta un ECM de 0,213 (IC 95% = [0,118; 0,33]), aquella asociada a la distribución Normal Truncada un ECM de 1,094 (IC 95% = [0,862; 1,364]) y aquella asociada a la Distribución Uniforme un ECM de 0,705 (IC 95% = [0,507; 0,90]).

Tabla A5.3. Resultados de las medidas estimadas vía bootstrap para la distribución de los índices generadas a partir de la distribución Beta Generalizada, Normal Truncada y Uniforme.

Distribución	Media	Desv. Estándar	Mediana	Mínimo	Máximo	ECM	IC 95%	Rango IC
$BG(\gamma, \omega, a = 1, b = 5)$	3,52	0,51	3,54	2,12	4,65	0,213	[0,118 ; 0,33]	0,212
$NT(\mu, \sigma, a = 1, b = 5)$	2,95	0,52	2,96	1,61	4,25	1,094	[0,862 ; 1,364]	0,509
$U(a = 1, b = 5)$	3,16	0,51	3,16	1,90	4,45	0,705	[0,507 ; 0,90]	0,392

De acuerdo a los datos generados mediante la distribución BG, el resultado del el resultado del Índice de Madurez es de 3,54. Y los Índices Locales son los que se presentan en la Tabla A5.4.

Tabla A5.4. Resultados para los Índices Locales de Madurez.

Factor de Madurez	Resultado del Índice de Madurez
CommTM	0,545
LeaderSh	0,474
TeamWork	0,432
WorkEnv	0,503
SupporOp	0,535
SPImprov	0,467
ProImpr	0,584

5.1.4 Cálculo de los Índices de Madurez

Una vez seleccionado el índice más apropiado según el modelo estadístico, se desarrollan las ecuaciones para cada uno de los ILM y con estos obtener la ecuación para el IGM. Las ecuaciones de los ILM incluyen los efectos de los Atributos que los explican y los efectos debidos a las relaciones de causalidad de los FM de los que dependen.

En este aparte se presenta el desarrollo de las ecuaciones y más adelante se simula una calificación factible, de acuerdo con la información estadística obtenida, de un tipo de evaluación de Atributos para ejemplificar la obtención de los perfiles y a partir de estos explicarlos, así como también la estrategia de evolución en la siguiente sección.

5.1.5 Tablas

Tabla A5.5. Estimación de los pesos de los atributos (λ_{ij}) y su transformación (α_{ij})

Factor	Atributo	Recodificación	Peso de atributo por factor (λ_{ij})	Peso de atributo por factor transformado (α_{ij})
TeamWork	LL2	x_1	0,715	0,192
	PS2	x_2	0,768	0,206
	TW2	x_3	0,792	0,213
	TW1	x_4	0,737	0,198
	LL3	x_5	0,710	0,191
WorkEnv	WE1	x_6	0,738	0,337
	WE2	x_7	0,729	0,332
	WS2	x_8	0,725	0,331
CommTM	HMC1	x_9	0,828	0,277
	HMC2	x_{10}	0,832	0,278
	HMC3	x_{11}	0,718	0,240
	IBP1	x_{12}	0,616	0,205
SupporOp	INN2	x_{13}	0,725	0,160
	SCLO2	x_{14}	0,813	0,180
	IBP4	x_{15}	0,773	0,171
	IBP3	x_{16}	0,727	0,161
	CIF1	x_{17}	0,833	0,184

	IBP2	x_{18}	0,652	0,144
LeaderSh	LDC2	x_{19}	0,773	0,268
	A1	x_{20}	0,767	0,266
	LL1	x_{21}	0,729	0,253
	A2	x_{22}	0,617	0,214
SPImprov	PIM2	x_{23}	0,826	0,157
	WI4	x_{24}	0,804	0,152
	WI3	x_{25}	0,802	0,152
	FC3	x_{26}	0,780	0,148
	PIM1	x_{27}	0,756	0,143
	PIM3	x_{28}	0,704	0,134
	PIM4	x_{29}	0,601	0,114
ProImpr	WPS1	x_{30}	0,767	0,175
	TU1	x_{31}	0,740	0,170
	WI1	x_{32}	0,739	0,169
	FC1	x_{33}	0,733	0,168
	PPC2	x_{34}	0,701	0,161
	FC2	x_{35}	0,685	0,157

Tabla A5.6. Estimación de la correlación entre factores (β_l) y su transformación

(α_l^*) Relación	β_l	α_l^*
CommTM - TeamWork	0,510	0,095
LeaderSh - TeamWork	0,320	0,059
TeamWork - WorkEnv	0,300	0,056
LeaderSh - WorkEnv	0,470	0,087
CommTM - LeaderSh	0,560	0,104
LeaderSh - SPImprov	0,160	0,030
SupporOp - SPImprov	0,650	0,121
SPImprov - ProImpr	0,320	0,059
TeamWork - ProImpr	0,270	0,050
SupporOp - ProImpr	0,390	0,072
LeaderSh - SupporOp	0,320	0,059
WorkEnv - SupporOp	0,390	0,072
CommTM - SupporOp	0,730	0,136

Tabla A5.7. Estimación de los pesos de factores

Factor	Peso de factor	Peso de factor modificado (π_j)
TeamWork	0,631	0,122
WorkEnv	0,735	0,142
CommTM	0,797	0,154
SupporOp	0,782	0,151
LeaderSh	0,697	0,134
SPImprov	0,687	0,132
ProImpr	0,857	0,165