



Contribución de la simulación computacional como método experimental en la construcción de teoría. Caso: Grupos de investigación, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín.

Luis Fernando Hincapié Pérez

Trabajo de investigación para optar al título de
Magíster en Gestión de Ciencia, Tecnología e Innovación

Directora

María Luisa Villalba Morales, Doctor (PhD) en Ingeniería

Universidad de Antioquia
Facultad de Ciencias Económicas
Maestría en Gestión de Ciencia, Tecnología e Innovación
Medellín, Antioquia, Colombia
2023

Cita	(Hincapié Pérez, 2023)
Referencia Estilo APA 7 (2020)	Hincapié Pérez, L.F (2022). <i>Contribución de la simulación computacional como método experimental en la construcción de teoría. Caso: Grupos de investigación Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín</i> [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Maestría en Gestión de Ciencia, Tecnología e Innovación, Cohorte XXI.



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes.

Decano/Director: Jair Albeiro Osorio Agudelo

Jefe departamento: Carlos Gilberto Restrepo Ramírez.

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Resumen

La simulación computacional (SC) se usa más como una herramienta que sirve para mantener el conocimiento científico validado que como un método experimental que sirva para construcción de teoría. Aunque la SC no es nada nuevo se sigue considerando controversial desde la metodología aplicada y desde los artículos publicados que informan los resultados de la teoría producto de la investigación. Bajo este contexto, se exploran los diferentes elementos que la componen, su nivel de relevancia en la SC y su incidencia en la publicación de los resultados. De este estudio se deriva que la confiabilidad de sus resultados dependerá de mejorar fuertemente las prácticas en el proceso metodológico en la teoría base, la verificación, la calidad de los supuestos, hacer un proceso iterativo riguroso modelo-simulación, y de la exploración de nuevas maneras de hacer la interpretación de los resultados. Llevar a cabo estas mejoras permite tener un número mayor de investigaciones y proyectos que den solución a problemas reales a la vez que crean nueva teoría en su propósito; además de proporcionar más confianza para reconocer y considerar los resultados adecuados para ser publicados; disminuir los artículos rechazados por revistas indexadas y elevar la calidad y capacidad de la investigación formativa.

Palabras clave: simulación computacional (SC), modelo computacional (MC), construcción de teoría, grupos de investigación.

Abstract

Computer simulation (CS) is used more as a tool that serves to maintain scientific knowledge validated than as an experimental method that serves to build theory. Although the CS is nothing new, it is still considered controversial from the applied methodology and from the published articles that report the results of the theory product of the investigation. Under this context, the different elements that compose it are explored, their level of relevance in the CS and their incidence in the publication of the results. From this study it is derived that the reliability of its results was obtained from improving practices in the methodological process in the base theory, verification, the quality of the assumptions, making a rigorous model-simulation iterative process, and exploring new ways to interpret the results. Carrying out these improvements allows having a

greater number of investigations and projects that provide solutions to real problems while creating new theory in its purpose; in addition to providing more confidence to recognize and consider the appropriate results to be published; decrease articles rejected by indexed journals and increase the quality and capacity of formative research.

Keywords: computational simulation (SC), computational model (MC), theory building, research groups.

Introducción

Nada es más práctico que una buena teoría (Levine y Moreland, 1990), pero construir teoría no es asunto sencillo (Suppes, 1967); lo que lo vuelve uno de los objetivos más significativos de un proceso de investigación. Hacerlo bien depende de la relación entre la práctica experimental, el proceso cognitivo de los investigadores (Padrón G., 1992), los criterios que lo validan, y de manera indirecta, la publicación de los resultados (Hazhir y Sterman, 2012; Whetten, 1989); es decir de la metodología. Entre los diferentes métodos de investigación existentes para creación de teoría, se encuentra el de la simulación computacional (Chanda y Ray, 2015; Davis et al., 2007; Diallo et al., 2013; Durán, 2018; Winsberg, 2009). Su uso en la construcción de teoría depende de la manera rigurosa del proceso o metodología escogida, la cual parte principalmente de la pregunta de investigación y de otras etapas significativas como el diseño e implementación del modelo computacional, la capacidad para reconocer los patrones emergentes o anomalías, y validar los resultados que indiquen la teoría como verdadera y novedosa, que puede solucionar el problema real que se quiere solucionar (Diallo et al., 2013).

Pero, a pesar de que la SC se considera una potente herramienta y de fácil acceso, su aplicación por grupos de investigación para creación de teoría como herramienta experimental no es fácilmente reconocible. Por una parte, porque su uso se confunde con otros tipos de simulación computacional, el proceso subjetivo-objetivo debe ser fuertemente comprobado (como la teoría base de la que parte, las suposiciones y la interpretación de los resultados), además de que las publicaciones que indican su uso están faltos de la información necesaria para reproducirlas (Hazhir y Sterman, 2012). Adicionalmente, no es fácil reconocer desde los artículos publicados y

desde los indicadores como los de *Web of Science*, *Scopus* o métricas alternativas (*Almetrics*), que dicho método es empleado en construcción de teoría. Otro aspecto relacionado es que en la práctica se tiene poca creación de teoría (Cash, 2020) y poco uso de simulación computacional como método experimental en su construcción (Cabrera A et al., 2009; López et al., 2016; Rodriguez Zoya y Roggero, 2014), lo que puede evidenciarse en grupos de investigación de alta categoría en Administración¹ (Calderón Hernández, 2014), quienes tienen escasa publicación en revistas de alto impacto (que se encuentren en los cuartiles superiores de ISI –*Institute for Scientific Information*– y *Scopus*) además de que la SC es poco practicada. Adicionalmente la mayoría de académicos no genera nueva teoría desde cero, sino que, parten de algo ya existente, lo que hace difícil juzgar lo que contribuye un valor agregado y suficiente para definirse como investigación que crea teoría y que merezca ser publicado (Whetten, 1989). Estos aspectos permiten inferir que es mucho más escaso encontrar publicaciones de investigaciones que usen la SC como método para creación de teoría que permita la solución de problemas reales y que se puedan reconocer que elementos del proceso representan más dificultad y de qué manera están ligados a la forma de comunicar los resultados.

El propósito de este trabajo es determinar que elementos subyacentes de la SC para construcción de teoría potencialmente impiden y afectan de manera fundamental su logro y de qué manera están estrechamente relacionado con las características de la publicación. La comprensión de estos elementos tiene implicaciones teóricas que ayudan a la fundamentación práctica para que la SC siga construyéndose como una alternativa relevante que permita aumentar el nivel de creación de teoría de los grupos de investigación académicos y publicar acorde, es decir, buscando que se desarrolle una teoría intelectualmente rigurosa y de utilidad práctica que pase las pruebas del tiempo y circunstancias (aplicación en diferentes dominios) en la solución de problemas prácticos.

Para lograr dicho propósito se llevan a cabo cuatro objetivos específicos: identificar los principales criterios que permitan valorar la SC en la literatura disponible con efectos en la creación de teoría,

¹ Alta categoría en Colombia según Colciencias. Colciencias era el Departamento Administrativo de Ciencia, Tecnología e Innovación de Colombia que fue transformado mediante la ley N° 1951 del 24 de enero de 2019 en el Ministerios de Ciencia, Tecnología e Innovación (el cual se conoce como Minciencias).

examinar dichos criterios en los artículos publicados por grupos de investigación² y por último, indicar como los grupos de investigación la usan y cuáles son sus buenas prácticas.

Marco teórico

Uno de los métodos más importantes de investigación para la creación y desarrollo de teoría es el método científico, cuya base principal es ser un método experimental. Con el auge de los computadores, la experimentación se puede hacer virtual (*in-silico*), lo que se conoce como simulación computacional (SC). Esta manera de construir teoría no deja de ser controversial tanto desde lo filosófico (Chanda y Ray, 2015) como desde lo epistemológico y metodológico (Rodríguez Zoya y Roggero, 2014). Aunque cuando se pretende la solución de un problema práctico con teoría, su enfoque es metodológico.

Construcción de teoría

El término teoría a lo largo del documento se deberá entender como un cuerpo de entendimiento que los investigadores construyen acumulativamente mediante un proceso de tipo inductivo y deductivo (Carlile y Christensen, 2011). Este proceso, se realiza en un sistema empírico, definido por constructos y variables, en el que los constructos están relacionados entre sí por proposiciones y las variables están relacionadas entre sí por hipótesis, y todo el sistema es limitado por los supuestos teóricos (Bacharach, 1989). Su uso se considera parte esencial de los grupos de investigación, ya sea actuando como consumidores o productores de estas (Suppes, 1967). Como productores es necesario demostrar su validez (interna y externa) y confiabilidad (que otro investigador pueda llegar a las mismas conclusiones de las mismas observaciones, lo que se hace principalmente desde las publicaciones) (Carlile y Christensen, 2011). Como consumidores, igualmente se debe reconocer su validez y confiabilidad para aplicarla.

² Este estudio se realiza en once grupos de investigación de una de las sedes de una universidad colombiana. Esta sede cuenta con 180 grupos de investigación reconocidos por Minciencias-Colombia (según convocatoria 833 del 2018), clasificados de la siguiente manera: 37 grupos categoría A1; 26 grupos categoría A; 24 grupos categoría B; 34 grupos categoría C; 10 grupos categorizados y 49 grupos sin clasificación –SC- quienes han contribuido con 2.268 artículos publicados entre 2015 y 2019, tanto en revistas indexadas reconocidas por Minciencias como en aquellas no reconocidas pero avaladas en el contexto de dicha Universidad.

Si se produce o construye teoría, el aporte investigativo debe ser significativo frente a los constructos existentes o deben demostrar relaciones existentes valiosas que no existían (Cash, 2020) y debe ser completa (Whetten, 1989). La nueva teoría debe revelar información no vista antes, ser capaz de explicar la teoría base inicial, así como direccionar cualquier subproblema que surja (Diallo et al., 2013). Nada de esto es fácil de lograr sin conocimiento y experiencia, tanto del fenómeno como del método de investigación (Lynham, 2002).

En parte, este conocimiento y experiencia generalmente es usado y pulido en los grupos de investigación de tipo académico. Un grupo de investigación académico se puede considerar un grupo pequeño (en comparación a grupos como los militares o como los de las grandes compañías farmacéuticas) cuya característica es que se pueden considerar propensos a utilizar la SC puesto que pueden abordar de manera práctica problemas complejos e interesantes, algo más difíciles de intentar de otra manera, lo que impacta la construcción de teoría, la metodología y la financiación. (Levine y Moreland, 1990), por lo que su uso podría ser recurrente en la práctica investigativa.

Construcción de teoría por simulación computacional.

Una simulación, en contexto amplio, consiste en diseñar e implementar un modelo de un fenómeno o sistema real que imite su funcionamiento y de esta forma se pueda estudiar lo que se pretenda conocer de este. La construcción de un modelo es una forma reconocida, significativa y simplificada de entender el mundo (Gilbert y Troitzsch, 2005; Robinson, 2020) que puede incorporar características reales y materiales de todo tipo, así como ecuaciones, términos teóricos, conceptos y técnicas matemáticas, puntos de vista políticos, supuestos, metáforas entre otros (Durán, 2018), por lo que puede ser expresada de forma física, matemática, lógica, visual, verbal, computacional o una combinación de estas (Diallo et al., 2015). Cuando dicho modelo es implementado y simulado en un computador, se denomina simulación computacional (SC) (Gilbert y Troitzsch, 2005). En la literatura suele encontrarse como “modelación computacional” (Poile y Safayeni, 2016), “modelado de simulación computacional” (Chanda y Ray, 2015), “simulaciones por computadora” (Beisbart, 2012), “modelación y simulación” -M&S- (Diallo et al., 2015), “simulación computacional” o simplemente “simulación”. En cualquiera de sus acepciones, la característica relevante común es que el modelo y la simulación no se pueden separar y su uso

aplique como método experimental, con el principal propósito de construir teoría para solucionar un problema específico del mundo empírico.

La SC suele confundirse en su uso como método experimental, con otros conceptos más instrumentales o radicalmente diferentes. Por ejemplo, para Begoña G (1998) la simulación es “una técnica” que permite analizar el comportamiento de un sistema conocido en unas circunstancias determinadas. Para Humphrey (2004) es un instrumento que le permite al ser humano superar falencias y limitaciones cognitivas (mejora de capacidades). Para Morrison (2009) es un “tipo de modelación mejorada” que tiene como fin optimizar las habilidades para producir conocimiento. Para Hoyos et al. (2016) una SC es construir un modelo computacional y tener un programa de computador que sea capaz de resolver el modelo sin alterar la respuesta del modelo matemático verdadero. Para Durán (2018), en una de sus acepciones, es la de encontrar soluciones a un modelo con el fin de solucionar problemas prácticos, bajo el concepto de mantenimiento del conocimiento existente. Todas estas otras formas de entender y usar la SC no cumplen la expectativa de método experimental. La SC, como método experimental, pretende definir patrones de comportamiento y crear teoría, tal y como lo presentan autores como Chandrasekharan, S. y Nersessian (2015), Davis et al (2007), Diallo et al. (2013), Durán (2018), Poile, C. y Safayeni (2016).

La SC suele utilizarse como método, cuando la experimentación en laboratorio (*in vitro*) o sobre sistemas reales (*in vivo*) es a menudo indeseable o imposible y/o está restringida por la trazabilidad matemática en la modelación formal, o éticamente no es posible de realizar, o cuando se considera demasiado complejo o se quieren superar las limitaciones clásicas del control experimental como en las ciencias sociales (Rodríguez Zoya y Roggero, 2014), también cuando el enfoque teórico es longitudinal, no lineal o procesal, o cuando los datos empíricos no son fáciles de obtener o cuando se requieren diferentes tipos de alcance del fenómeno, no sólo el físico, sino también que pueda ser invisible o astronómico o cuántico (Durán, 2018). El cubrimiento de todos estos casos podría incluir como resultado nueva teoría. Lo que no es ni puede entenderse como SC es la computación gráfica, ni el estudio del tiempo de ejecución para hacer programas informáticos más cortos y con menos complejidad algorítmica (Maldonado y Gómez Cruz, 2010), ni en el proceso de disponer de datos iniciales para el modelo; aquí no hay experimentación, ni patrones que se puedan considera emergentes.

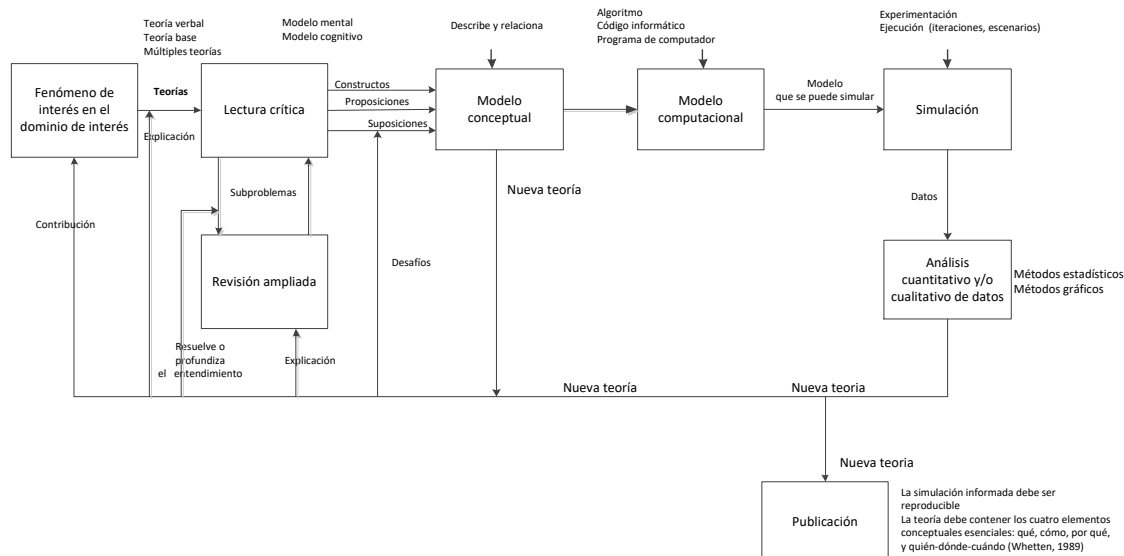
La SC también tiene diferentes propósitos de investigación (Poile y Safayeni, 2016). Cuando el propósito principal es el de construcción de teoría, es necesario que los grupos de investigación y la comunidad científica tengan un entendimiento notable del proceso en el que descansa la metodología de simulación (Davis et al., 2007), que no está basada en reglas formales y métodos sistemáticos, aunque lo parezca (Diallo et al., 2013). Además de que descansa en el ideal de la estabilidad del comportamiento, confiabilidad, robustez y continuidad dada en el diseño del modelo y la programación; con alta incidencia en las especificaciones, algoritmos y procesos informáticos, como componentes importantes de una simulación (Durán, 2018) que pueden ser implementados y validados en los diferentes tipos, métodos o paradigmas de simulación que se encuentran en la literatura (Davis et al., 2007; Diallo et al., 2015; Durán, 2018; Hester y Tolk, 2010; Martínez Marín y Arango Aramburo, 2017; Rodríguez Zoya y Roggero, 2014; Salazar, 2009; Torres Vélez, 2019); y puede ser potencializados en los grupos de investigación llevando a cabo buenas prácticas en la aplicación y publicación de los resultados al utilizarla.

Esta metodología implica que el investigador tenga una teoría cognitiva del fenómeno bajo estudio, lo operacionalice en un modelo conceptual en donde se asumen suposiciones razonables, constructos y proposiciones para luego ser traducido a un modelo computacional (programa informático) el cual, al ejecutarlo (a modo de experimentación) permitirá derivar la teoría que resuelve la pregunta de investigación. (Diallo et al., 2013; Poile y Safayeni, 2016). La teoría surgida debe tener un nivel de generalización importante, encontrar los puntos en común entre teorías dispares; así como ser clara y de fácil comunicación. Todo ello porque la teoría surgida debe ser concreta, carecer de ambigüedades, tener consistencia interna, ser lo suficientemente específica y que sus variables y constructos pueden ser operacionalizados y medidos, que no es tan fácil puesto que muchos de los constructos no tienen aún forma de medirse (Davis et al., 2007; Poile y Safayeni, 2016). Al final de la simulación lo más probable es que se tenga una teoría base o proto-teoría (Borsboom et al., 2021; Carlile y Christensen, 2011), que es frecuentemente derivada de casos inductivos, que se vuelve teoría formal de lógica precisa e integral, al ser efectivamente examinada usando lógica deductiva y evidencia empírica (Carlile y Christensen, 2011; Diallo et al., 2013) de una manera iterativa.

En la **Figura 1** se condensan los diferentes elementos que componen una investigación, haciendo uso de SC para construcción de teoría. Se resaltan dos componentes significativos del proceso, la teoría inicial, la que se considera una de los principales aspectos de partida del proceso y la publicación, la parte final del proceso, que no debe obviarse por los grupos de investigación. Allí también se pueden inferir que desde el modelo conceptual (método clásico) o desde los datos, también se puede crear teoría, igualmente se hace evidente y necesario el concepto iterativo modelación-simulación (desafíos) cuando los resultados de la simulación (datos) se interpretan e indican que se necesita un nuevo ajuste en los componentes del modelo conceptual o en el modelo computacional.

Figura 1

Una aproximación a la construcción de teoría por simulación computacional



Fuente. Adaptado de Diallo et al. (2013, p. 199)

Al final del proceso, la teoría surgida debe ser adecuada y válida, por lo que los siguientes aspectos se debieron considerar:

-
- La teoría inicial: si el fenómeno es poco conocido y no se tienen teorías o modelos anteriores, o existen intereses de valores u otro tipo; es deber del grupo de investigación velar por esto y extender la revisión de lo conocido desde el mayor número posible de datos conocidos y desde la revisión crítica de la literatura.
 - El adecuado diseño del modelo: nada relevante debe quedar por fuera y nada que cargue o que o no sea representativo debe quedar en este. Incluye los constructos, proposiciones y suposiciones. Además, debe ser el garante de que la teoría base inicial (verbal, mental o cognitiva) sea fielmente reflejada en el modelo conceptual.
 - Una construcción confiable del modelo computacional: el programa informático debe ser el adecuado, tanto si es software comercial o un desarrollo propio. Si se usa software comercial se debe tener la mayor información posible de este y ser consciente de que también limita lo que se puede conocer (no se conoce el código). Si se decide construir el programa informático debe escogerse un lenguaje de programación con algunas características especiales tales como ser estructurado e incremental, que se pueda codificar, comprobar, modificar y depurar, entre otros.
 - Llevar a cabo la verificación y validación (interna y externa) mediante métodos adecuados. La verificación debe constatar que el programa haga lo que estaba previsto que hiciera. Si no se lleva a cabo es probable que la traducción al código informático no represente adecuadamente el modelo. La validación refiere a que la simulación es un buen modelo del fenómeno o sistema objetivo, y se considera potencialmente peligrosa si no se realiza de manera adecuada (Diallo et al., 2015). Cualquiera de los dos métodos que no sea llevado a cabo con la debida rigurosidad tendrá una teoría débil de fácil refutación.
 - Suposiciones y análisis de sensibilidad: en particular, las suposiciones, la sensibilidad y la racionalidad esperada de estas es un tema controversial porque está limitada por la racionalidad de lo conocido (Torres Vélez, 2019); lo cual tiene consideraciones de importancia al realizar la interpretación de los resultados para construir teoría. Es decir, las suposiciones sirven para definir con mayor especificidad el fenómeno que quiere representar pero se debe tener presente que pueden haber muchas otras suposiciones que se podrían utilizar, lo que se conoce como problema de equifinalidad (Poile y Safayeni, 2016). Ello tiene implicaciones

prácticas ya que es difícil probar que el modelo conceptual es programado con exactitud dentro del modelo computacional, por lo que el código es la única descripción exacta del modelo computacional (Durán, 2018) que permite saber que la emergencia es provocada o su base lógica es suficientemente fuerte.

- Interpretación de los resultados de la simulación: al ejecutar la simulación, los resultados son almacenados, visualizados y analizados para dar respuesta a la pregunta de interés. Los resultados son mayormente datos en diferentes tipos de formatos de salida que pueden ser cuantitativamente valorados y cualitativamente analizados, usando principalmente análisis estadístico con lo que se logra hacer generalizaciones y crear teoría. Esta situación pone un peso relevante en que los grupos de investigación deben hacerse acompañar de investigadores con un profundo conocimiento de estadística, puesto que, de no hacerlo, la comprensión de las emergencias probablemente no sería correctas.
- Publicación de los resultados: la contribución teórica no solo debe ser considerada adecuada por el investigador o grupo de investigación, sino que debe ser puesta al escrutinio de la comunidad científica e interesados. En las revistas convencionales se puede detallar poco porque no hay espacio para los códigos y otro material específico; lo que merma la posibilidad de replicar la simulación para entendimiento y validación de la teoría por los interesados en esta, lo que a la vez disminuye el desarrollo posterior y utilización en otros dominios (generalización).

Resultados y publicación

Al usar la SC como alternativa y solución comparable a los experimentos de laboratorio (Durán, 2018; Gould et al., 2016; Salazar, 2009); se realiza procesos similares pero diferenciados en la metodología de uso, que parten de combinar observaciones (datos), partes de teoría, experiencia, conocimiento e instinto (Durán, 2021; Lynham, 2002); cuya aplicación se traslada a elementos importantes de la SC con consecuencias fatales en su aplicación si no está debidamente validada y considerada fiable. De ahí su dificultad para aplicarse y comunicar sus resultados, además de que se considera todavía poco comprendida por parte de la comunidad científica (Harrison et al., 2007). Es por ello que la publicación se debe considerar una buena práctica para

validar la teoría surgida lo que a su vez depende de buenas prácticas de la metodología realizada y de buenas prácticas para dar a conocer los resultados.

Este aspecto se considera de interés permanente cuando se trata de informar sobre nueva teoría. Estos resultados deben presentarse de manera precisa y clara, cualquiera sea el enfoque que se utilice (Barney, 2018). Para ello se debe tener en cuenta que la misión de una revista de desarrollo de teoría es el de desafiar y extender el conocimiento existente, no simplemente reescribirlo, por lo que la aceptación para publicarlo debe cumplir ciertas expectativas, principalmente la de entregar el conjunto de elementos conceptuales que respondan el qué, cómo, por qué, y quién-dónde-cuándo, que permitan apreciar la teoría como verdadera; y que sea escrito con las consideraciones adecuada para ser publicado, especialmente aquellas que tienen que ver con la claridad, cuál es la contribución e impacto de la investigación, así como la oportunidad y pertinencia (Whetten, 1989).

En el caso de los informes de investigación o artículos de teoría en SC, muchos de ellos carecen de lo necesario para reproducir³ los modelos de simulación que analizan los experimentos de simulación específicos que informan, así como las ejecuciones⁴ llevadas a cabo en el modelo; lo que se considera un asunto de transparencia y confiabilidad en la investigación por lo que se deben tener unas pautas mínimas de presentación y lo mejor sería un escenario requerido como lo propone Hazhir, R. y Sterman (2012). Algunos ejemplos de este escenario requerido van dirigidos a superar la falta de información en aspectos como el análisis de sensibilidad y solidez en los parámetros del algoritmo, información de los costos computacionales en tiempo y procesador (sobre todo cuando se consideran significativos), proporcionar el código original y las instrucciones para realizar el experimento de simulación en la plataforma original. Para lograrlo se necesita que el grupo de investigación tenga buenas prácticas para lograr informes o publicaciones de experimentación por medio de SC de manera adecuada. Hazhir, R. y Sterman (2012) lo resume así: buenos hábitos de comunicación por medio de la presentación de informes en la formación inicial

³ Reproducir es diferente a replicar. La replicación usa el mismo modelo con mismos resultados. La reproducibilidad implica obtener los resultados sustantivos.

⁴ Las ejecuciones (experimentos) del modelo de simulación tienen en cuenta las diferencias entre iteraciones y escenarios. Las iteraciones usan los mismo parámetros y valores exógenos, pero internamente algunas instancias difieren. Los escenarios difieren en los parámetros o valores de las variables exógenas.

de los investigadores; debe ser una directriz del grupo de investigación; se deben reproducir las simulaciones publicadas y realizar una valoración de lo publicado como objeto de entrenamiento para investigadores y método de presión para asegurar posteriormente un cumplimiento de buenas prácticas entre ellos; las revistas más centradas en la investigación por simulación también deben llenar las expectativas de publicación y tener un mínimo de valoración de las simulaciones.

Metodología

El enfoque principal de la metodología usada en este estudio es mixto, compuesto de un análisis de contenido y un caso de estudio múltiple para conocer las buenas prácticas de uso de SC. Se parte de la pregunta ¿cómo y por qué los grupos de investigación usan la simulación computacional (SC)? De la que se deriva la proposición de que no se conoce el aporte real de la SC como metodología, en la creación de teoría por parte de los grupos de investigación, inclusive desde los artículos publicados.

Para desarrollar la proposición, en primera instancia, se hace un análisis de contenido de 2.268 artículos publicados entre 2015 y 2019 tanto en revistas indexadas como no indexadas, por docentes investigadores que hacen parte de los grupos de investigación de una universidad colombiana en una de sus sedes y que podrían usar la SC como método experimental. De allí se definen que grupos de investigación usan la SC de manera general al asociar los investigadores autores de estos artículos a estos grupos.

Posteriormente se realiza un estudio de caso múltiple, cuya unidad de análisis es el grupo de investigación, con el cual se persigue definir las buenas prácticas que utilizan en el proceso de creación de teoría. Ello se realiza mediante una entrevista semiestructurada que tiene una lógica de repetición literal (Hollweck, 2016). Los resultados de cada caso serán cruzados con el resto de casos para derivar las conclusiones del caso múltiple. Al final se presenta las implicaciones de ambos procesos según la proposición.

Selección de artículos con simulación computacional

De los 2.268 artículos publicados entre 2015 y 2019 (**Tabla 1**), se seleccionan aquellos que explícitamente usan el término de “simulación computacional”, “simulación por computador”, “simulación” y “computacional” (en inglés o en español). Del listado resultante se descartan aquellos que no cumplen con los criterios dados en la **Tabla 2** y que usan la SC de manera instrumental. La búsqueda se realiza en títulos, resúmenes, conclusiones y metodologías de cada uno de los artículos. No se usa ninguna herramienta de análisis de contenido, aprendizaje de máquina o similar automatizado.

Tabla 1

Artículos de investigación publicados entre los años 2015-2019

Tipo de documento	2015	2016	2017	2018	2019	Total
Artículo de revista	460	427	451	397	324	2.059
Artículo de revista no clasificada por Colciencias	48	47	42	45	27	209
Total	508	474	493	442	351	2.268

Nota. Los 2.268 artículos identificados se encuentran asociados con 3.112 autores. Ni el artículo, ni el investigador es asociado a un grupo de investigación. El caso es que un investigador puede pertenecer a más de un grupo.

De esta selección se desprenden los artículos, investigadores y grupos de investigación que usan la SC con el propósito de resolver un problema real con nueva teoría. A su vez, la selección de los grupos a entrevistar parte del diseño de opuestos según los criterios mencionados en la **Tabla 2** y que se encuentren dentro de todas las categorías definidas por Minciencias para grupos de investigación en Colombia (A1, A, B, C, D, reconocidos -R-, sin categoría -SC-) que pertenezcan a la ciencias sociales y naturales. El diseño de opuestos define grupos de investigación que publican más en revistas especializadas de simulación vs los que publican poco en revistas especializadas, así como aquellos grupos que publican más en revistas multidisciplinarias vs aquellos grupos que publican poco.

Tabla 2

Criterios definidos para reconocer el uso de la simulación computacional en los artículos y su relación con la construcción de teoría.

ítem	Criterio	Descripción	Relación con construcción de teoría
------	----------	-------------	-------------------------------------

1	Uso de la simulación en la metodología	Uso o no de la simulación en la metodología del artículo	Es posible que sea usada como un método experimental para construcción de teoría. Se debe relacionar con otros criterios para definirlo con mayor precisión.
2	Tipo de revista en la que se publicó	Hace referencia si la revista es especializada en simulación o pertenece a otra disciplina (multidisciplinaria)	Hay mayor posibilidad de que un artículo publicado en una revista especializada en simulación o desarrollo de simulación genere teoría. Se debe relacionar con el cuartil a la que pertenece la revista.
3	Impacto de la revista	Corresponde a los valores dados por SJR-Scimago a la revista de acuerdo al año de publicación. El mejor cuartil es el Q1, le siguen el Q2, Q3 y Q4	La calidad de la revista está relacionada con la calidad de los pares y con la política editorial de la revista. Su exigencia es mayor en todos los aspectos de resultados y escritura del artículo. La probabilidad de presentar teorías es mayor.
4	Citaciones del artículo	Número de citas del artículo reportados en la base de datos Scopus	El número de citas implica que la comunidad científica principalmente valida y prueba los resultados. Hay mayor posibilidad de que la teoría se desarrolle cuanto más investigadores comprueban y usan sus resultados.
5	Método de simulación	Corresponde al método de simulación usado en los artículos	Los métodos de simulación indirectamente sirven para conocer cuáles podrían ser más susceptibles de ser usados para creación de teoría. Principalmente aquellos que están por fuera del concepto de SC basadas en ecuaciones (Durán, 2018) como por ejemplo las simulaciones basadas en agentes. Sin embargo, sigue dependiendo de la pregunta de investigación y aplicación como un método de experimentación.
6	Software utilizado	Refiere a la aplicación informática utilizada para llevar a cabo la simulación	Su conocimiento también indirectamente sirve para conocer aquellas aplicaciones más usadas para sostenimiento del conocimiento y que se usan comúnmente de manera instrumental. Cuando hay una construcción propia es más probable que se esté buscando nuevo conocimiento.
7	Evidencia de validación explícita	Corresponde a identificar si está o no explícita en el documento	Si el artículo indica la realización de la validación, se genera confianza en los resultados. Si el artículo usa SC, es probable que el resultado deba ser correlacionado con los otros criterios.
8	Evidencia de verificación explícita	Corresponde a identificar si está o no explícita en el documento	Indica que no hay dudas en el modelo computacional y que el resultado de la simulación puede presentar las emergencias que dan paso a las teorías.

9	Tipo de simulación	Según si la experimentación realizada mediante SC es caracterizada como instrumental o de reconocimiento de patrones	Caracteriza la simulación de una forma generalizada entre simulación basada en ecuaciones y las que no lo son (Durán, 2018). Explícitamente define si se realiza con fines de creación de teoría.
---	--------------------	--	---

Entrevista semiestructurada.

La entrevista semiestructurada se aplica como parte de un estudio de caso múltiple a los grupos de investigación antes seleccionados en búsqueda de conocer las buenas prácticas de uso de SC cuando construyen teoría. El estudio de caso múltiple se basa en un diseño de repetición literal en el que los resultados de cada caso (cada grupo de investigación entrevistado) al cruzarse con los demás casos dan paso a las conclusiones generales.

La entrevista semiestructurada, es llevada a cabo principalmente con el líder del grupo de investigación, aunque tres de ellas no se hacen con los líderes de los grupos por circunstancias que tienen que ver con sus ocupaciones o por negativa de estos; sin embargo, se hacen con líderes de líneas de investigación dentro de dichos grupos o de investigadores pertenecientes a un grupo (solo un caso). Se realizaron 17 preguntas en un tiempo aproximado de 1 hora, que contienen 4 temas principales (interés y uso de la simulación, confiabilidad de la metodología, limitaciones y debilidades, y uso de los resultados). El número total de entrevistas fue de 11 y el rango de fechas en que se realizaron se encuentra entre el 6 de abril y el 2 de junio del 2022, cinco de ellas se hacen de manera virtual y seis de manera presencial en oficinas o laboratorios de la sede universitaria en horarios que oscilaron entre las 8:00 am y 6:00 pm; diez de ellos permitieron grabar la entrevista.

Resultados y discusión

Primero es necesario hacer algunas observaciones en cuanto al alcance de la simulación en este análisis y resaltar algunas limitaciones.

Se aclara que, en este trabajo no califica o descalifica una teoría. El estudio se enfoca en los elementos de la SC que permiten una contribución en la construcción de teoría, dejando de lado aquellas simulaciones en donde su uso es considerado instrumental. Se aplica a sistemas o fenómenos del mundo real de todo tipo (Durán, 2018) en donde su valor epistemológico se considera igual al que se puede desarrollar en una investigación con un método experimental en laboratorio o en vivo.

También se debe considerar la diferencia existente entre “modelo computacional”, “modelación computacional” y “simulación computacional”. En la literatura y artículos objeto de estudio, suelen considerarse algunas veces equivalentes (Chanda y Ray, 2015) pero no lo son. El término “modelación computacional” se aplica al proceso de crear un “modelo” para computador, y no precisamente al de hacer una simulación como experimento, aunque la mayoría de las veces aplique hacer simulaciones como parte del proceso de ajuste del modelo. En este estudio se consideran similares “modelación computacional” y “simulación computacional” cuando se ejecuta la simulación con propósitos de experimentación.

Las metodologías, métodos o paradigmas principales utilizados como referencia en este artículo son los mencionados por Diallo (2015), Durán (2018) y Davis et al. (2007) quienes los clasifican de manera particular y limitada.

Respecto a las limitaciones se tiene que los criterios buscados y definidos en los artículos se hacen por juicio humano y no se usa ninguna herramienta de análisis de contenido, aprendizaje de máquina o similar automatizado que podría garantizar una mayor estandarización. También se tiene que en las entrevistas se aplica la estrategia de estudio de caso múltiple de “repetición literal” de las preguntas; pero, por la dinámica de esta, pueden haberse realizado las preguntas en un orden diferente a como inicialmente fueron planteadas, lo que no modifica el logro de los aspectos más sustantivos buscados con esta.

Dadas las observaciones de los alcances y los limitantes, a continuación, se presentan los resultados y la discusión de acuerdo a las dos etapas del análisis. En primer lugar, se presenta el análisis de la producción científica de los grupos de investigación; y, en segundo lugar, se hace la

identificación y discusión de las buenas prácticas que realizan los grupos de investigación en su uso.

Análisis de la producción científica de los grupos de investigación

De 2.268 artículos, inicialmente se tienen 50 (2,20%) que tienen el término simulación (“simulación”, “*simulation*”, “*simulated*”, “simulador”) en el título (39 artículos) o que son clasificados por el autor como de “simulación” en el área específica de conocimiento⁵ (11 artículos). Estos 50 artículos son publicados por 28 docentes investigadores asociados a 33 grupos de investigación (un investigador puede estar asociado a más de un grupo de investigación). Ninguno usa el término simulación computacional. En este aspecto, los artículos de SC usan un título preciso que no hace referencia completa a simulación computacional, sino al tipo de simulación realizado (basada en agentes, elementos finitos, entre otros), que pueden ir relacionados con los términos “experimentos” y “patrones” que indican una investigación con aportes teóricos relevantes. Por otra parte, de los once (11), dos (2) de ellos se definen de simulación numérica y dos (2) se publican en revistas específicas para simulación (*System Dynamics Review* y *Journal of Simulation*), lo que permite deducir que son pocos los artículos enviados y publicados en revistas específicas de simulación; además de que los grupos de investigación que lo hacen, están asociados a las ciencias aplicadas y ciencias informáticas. Estos 50 (2,20%) artículos iniciales se hacen relevantes puesto que definen explícitamente que hay una relación de simulación (experimental) que se vinculan a hallazgos teóricos y construcción de teoría; por otro lado, hay 2.218 (97,80%) artículos de los que se desconoce su vinculación con la SC y la búsqueda de esta relación se hace mediante la revisión de cada artículo en el cumplimiento de los criterios de la **Tabla 2**.

En total se definen que hay 376 (16,58%) artículos de los 2.268 (100%) publicados, que usan la SC como método experimental con aportes teóricos, los cuales se encuentran asociados a 136 investigadores que pertenecen a 95 (52,78%) grupos de investigación, de un total de 180 (según resultados de convocatoria Minciencias 833 de 2018 para la Sede de la Universidad en estudio).

⁵ Esta clasificación es definida por el docente investigador de acuerdo con su criterio en el momento de ingresar o reportar la información a la universidad que pertenece, para los fines académicos institucionales que tengan definidos; entre ellos, conocer lo que publican sus investigadores y el área o campo específico en el que se trabajó y publicó.

Estos resultados permiten conocer que dicho método o metodología es conocida y aplicada por gran cantidad de grupos de investigación, pero no se puede inferir si los artículos publicados son representativos en general frente a otros métodos que buscan crear teoría o se usan de manera mixta para ello.

De estos 376 artículos de simulación, 290 (77,13%) la usan en el contexto de simulaciones computacionales basadas en ecuaciones (Durán, 2018) y el resto, es decir, 86 (22,78%) los usan con otro tipo de simulaciones (como por ejemplo, basadas en agentes, dinámica de sistemas). Se sigue ratificando su uso con un fuerte componente matemático. Así mismo; 7 (1,86%) de los artículos se publican en revistas de simulación (en cualquiera de las áreas que la componen); 210 (55,85%) artículos son publicados en revistas de alto impacto con ranking Q1 y Q2 en SJR-Scimago, lo que denota la aceptación de la simulación en la construcción de teoría por los grupos de investigación; 64 (17,02%) de los artículos con simulación son publicados en revistas no clasificadas por Minciencias-Colombia lo que implica que su aporte teórico no se considera suficiente para llevarlo a revistas de más alto nivel. Se concluye que la publicación se hace principalmente en revistas multidisciplinarias y la SC es una herramienta que puede contribuir en cualquier área. Adicionalmente, la gran mayoría tiene entre 1 y 10 citas (46,01%) y solo una (0,27%) tiene 153 citas, además hay un 34,30% (139) sin citas o que no aparecen en Scopus.

En cuanto a los métodos más usados están la simulación numérica (21,81%), simulación estadística (12,5%), simulación con elementos finitos (9,57%), técnicas heurísticas y metaheurísticas (9,31%) y en quinto lugar la simulación de Montecarlo (7,71%), sumando en total el 60,9%. Otros tipos de simulación se consideran en minoría. Y respecto al software utilizado; un alto porcentaje no es explícito (25,80%, 97 artículos), le sigue el uso del paquete estadístico R, Matlab y ANSYS. Lo que permite concluir que los métodos encontrados y más usados en los artículos siguen siendo la simulación numérica -elementos finitos- y la simulación estadística de aplicación principalmente en el campo de la ingeniería y estadística. Los métodos anteriores contrastan con los resultados de las entrevistas. En las entrevistas, los principales métodos nombrados son los de simulación basada en agentes, dinámica de sistemas, sistemas multiagentes, y también la simulación estadística. Se considera que la principal razón subyace en el carácter

formativo de la investigación y su utilización académica pero no materializada en los productos de las investigaciones. Es decir, se tiene presente, se considera útil, y los diferentes métodos son explorados, pero su profundidad no llega a una utilización efectiva en proyectos e investigaciones que puedan producir artículos o teoría publicable con su uso. Dos aspectos se deben tener en cuenta, el uno es la tradición y madurez en los tipos de simulación clásicos en las ciencias naturales (sobre todo la simulación estadística y simulación numérica, basados en datos de campo y modelos matemáticos) al interior de los grupos de investigación. El otro aspecto es que aún hay reservas en el uso de la simulación en otras disciplinas como las de las ciencias sociales o similares, sin desconocer que los sistemas complejos son cada vez más dependientes de tecnologías como la SC. La tercera, es la dificultad para aplicarla, aunque parece fácil.

Desde el uso del software para SC, un aspecto a tener en cuenta con la utilización del software comercial, es que no se detalla y menos aún se incluye el código o funciones utilizadas en los artículos publicados, lo que impacta la confiabilidad de la solución y de la teoría surgida. Son varias las razones, algunas de ellas pueden ser que el software comercial es altamente estándar y de fácil acceso (no se tiene en cuenta el asunto económico en este caso y el conocimiento que se debe adquirir para su uso), por lo que, con pocas referencias, se podría repetir el experimento; otro aspecto tiene que ver con las restricciones del tamaño del artículo que exigen las revistas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta el riesgo que existe cuando se deposita demasiada confianza en la herramienta o aplicación informática (el software) y se pretenda omitir la verificación (es decir, que el modelo conceptual está correctamente implementado en la aplicación informática) ya que de alguna manera se considera establecido en la construcción del software. Esto se debe meditar puesto que en la evidencia del uso de la verificación explícita o referenciada en los artículos es de 4 (1,06%). Se infiere que los grupos de investigación no hacen la verificación explícita en los artículos porque descargan la confiabilidad en el software comercial; lo que puede ser profundamente negativo para la interpretación de los resultados (darles sentido falso o tener una teoría falsa, que podría posesionarse por un tiempo, lo que retrasaría la producción de conocimiento válido). Se considera un vacío en la publicación y posiblemente en la aplicación de la metodología de la SC.

Caso contrario al de la verificación, es el de la validación externa (tiene que ver con que el modelo representa fielmente la realidad y los resultados están de acuerdo a lo que muestra el mundo real). La validación se considera explícita en 203 (53,99%) de los artículos. Criterio que indica la madurez y trayectoria de este método de manera general en los grupos de investigación y también en las investigaciones con SC.

Todos estos datos pueden verse en la **Tabla 3** y la relación que tienen con la construcción de teoría.

Tabla 3*Resultados según criterio relacionado (artículos entre 2015 y 2019)*

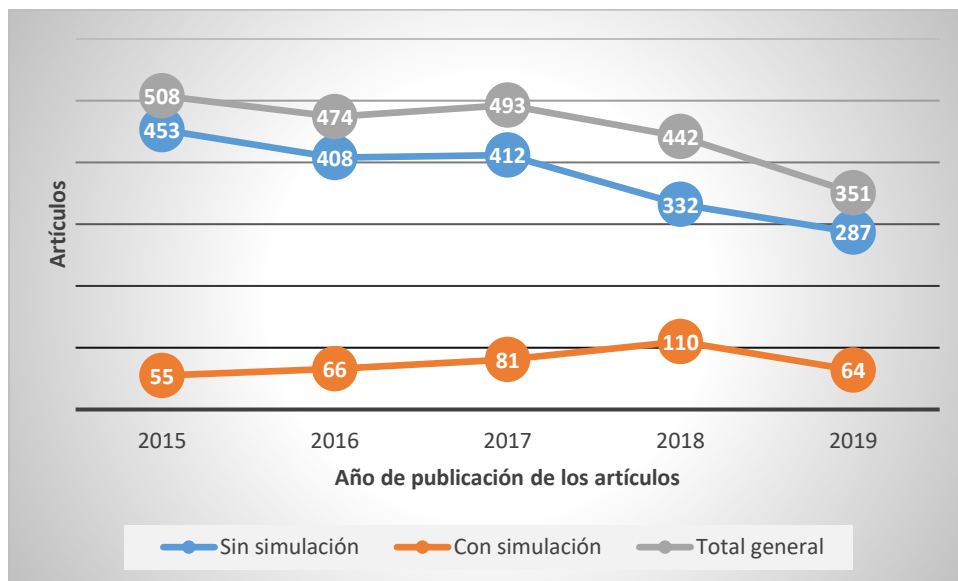
Criterio	Descripción	Cantidad	Porcentaje relativo a los artículos con simulación	Porcentaje comparado al total de artículos publicados	Relación con la construcción de teoría
Uso de la simulación en la metodología	Usa la SC como método experimental	376	-	16,58%	Usan la SC como método experimental
	No usa SC	1892	-	83,42%	Se usan otros métodos de investigación
Tipo de revista en la que se publicó	Especializada en simulación	7	1,86%	0,31%	El escrutinio de la teoría surgida en las revistas con SC es más difícil de justificar.
	Multidisciplinaria	369	98,14%	16,27%	El uso es transversal a las disciplinas.
Impacto de la revista	Q1	144	38,30%	6,35%	Los artículos publicados en estas revistas se consideran con alto aporte teórico y al usar SC como método experimental se relaciona con creación de teoría
	Q2	66	17,55%	2,91%	Similar observación que en el cuartil Q1
	Q3	76	20,21%	3,35%	
	Q4	26	6,91%	1,15%	
	No se encuentran en Scopus	64	17,02%	2,82%	
Citasiones del artículo	Cero citasiones	51	13,56%	2,25%	La relevancia del aporte para el momento es mínima.
	Entre 1 y 10	173	46,01%	7,63%	
	Entre 11 y 20	40	10,64%	1,76%	
	Entre 21 y 35	22	5,85%	0,97%	
	Entre 37 y 50	6	1,60%	0,26%	La relevancia del aporte teórico es alta.
	Entre 62 y 80	5	1,33%	0,22%	
	153 citasiones	1	0,27%	0,04%	
	No aparecen en Scopus	78	20,74%	3,44%	

Método de simulación	Simulación numérica	82	21,81%	3,62%	La teoría surgida con estos métodos de simulaciones es marcadamente más difícil definir.
	Simulación estadística	47	12,50%	2,07%	La teoría surgida con estos métodos de simulaciones es más correlacional que casuístico. Produce teoría limitada.
	Simulación elementos finitos	36	9,57%	1,59%	La teoría surgida con estos métodos de simulaciones es marcadamente más difícil definir porque puede confundirse con el uso instrumental de la SC.
	Técnicas heurísticas y metaheurísticas	35	9,31%	1,54%	La opción por SC representa una alternativa metodológica específica de solución aproximada. Se pueden llegar a teorías base.
	Simulación Monte Carlo	29	7,71%	1,28%	La teoría surgida con estos métodos de simulaciones es acentadamente predictora.
Software utilizado	No es explícito en los artículos	97	25,80%	4,28%	
	Paquete estadístico R	17	4,52%	0,75%	Marcadamente estadístico y matemático, limitando el aporte teórico a un mínimo incremental que no puede ser fácilmente discernible como nueva teoría.
	Matlab/Simulink	16	4,26%	0,71%	
	ANSYS	11	2,93%	0,49%	
	Matlab	11	2,93%	0,49%	
Evidencia de validación	Explícita	203	53,99%	8,95%	Interna y externa. La teoría surgida no tiene ambigüedad y se han descartado otras teorías similares y se puede aplicar en otros contextos con confianza
	No es explícita	173	46,01%	7,63%	No se podría confiar mucho en la teoría surgida.
Evidencia de verificación	Explícita	4	1,06%	0,18%	Hace la teoría más confiable y se pueden estudiar mejor los patrones o anomalías.
	No es explícita	372	98,94%	16,40%	La teoría surgida puede ser fácilmente falseada porque no se conoce el código o con profundidad el software. La parte de la SC afectado no se distingue si es del modelo o de la teoría inicial.
Tipo de simulación	Simulaciones diferentes a las basadas en ecuaciones	86	22,87%	3,79%	La probabilidad de presentar una teoría es más alta. Y se relaciona con áreas de las ciencias sociales, administrativas, económicas. Entre ellas se encuentran las simulaciones basadas en agente, dinámica de sistemas, entre otros.
	Simulaciones basadas en ecuaciones	290	77,13%	12,79%	El proceso principal es el de desarrollar teoría, con aporte incrementales. Es más difícil de probar y su base es marcadamente matemática.
Grupos de Investigación asociados	Total, de grupos	95 de 180*	-	52,78%	La SC no es ajena a los grupos de investigación. Aunque existen fuertes diferencias en la cantidad de artículos publicados por grupo, por lo que se considera que ya tienen establecida la SC como método de investigación y construcción de teoría.

*Sede con 180 grupos de investigación para el año 2018 según la clasificación que hace Minciencias en Colombia (A1, A, B, C, D, reconocidos -R-, sin clasificar -SC-).

Figura 2

Cantidad de artículos con simulación computacional por año (2015-2019)



De este apartado, la contribución de la SC desde los artículos publicados se considera contradictoria y cuantiosa, es decir, 376 artículos con SC para teoría, equivalente al 16,58%, es bastante representativo; siendo solo uno de los múltiples métodos que se podrían usar para ello. Por otra parte, según la **Figura 2**, su utilización no crece significativamente a pesar de la facilidad de poder adquirir software y hardware, lo que se debe a la dificultad del método por la flexibilidad o no estandarización de la metodología para abordarla como método experimental.

Identificación de buenas prácticas

Para la identificación de buenas prácticas por parte de los grupos de investigación en el uso de la SC, se llevó a cabo una entrevista semiestructurada, la cual fue ajustada con 2 grupos de prueba. Los once grupos entrevistados se encuentran listados en la **Tabla 4** como los grupos del G1 hasta el G11. De estos 11 grupos, cuatro están categorizados en A1, tres en A, uno en B, y tres en C. Esta categoría es dada en Colombia, por el Ministerios de Ciencia Tecnología e Innovación (Minciencias), de acuerdo al cumplimiento de ciertos requisitos. Siendo los grupos A1 y A los de alto rendimiento.

Cinco (5) entrevistas se hicieron de manera virtual y seis (6) de manera presencial. Solo una de ellas (la del grupo G9) no fue permitido grabarla; las demás quedan a disposición de los lectores ya que no se solicita confidencialidad. De los once (11) grupos entrevistados, siete (7) de ellas se hicieron con los líderes de los grupos, dos (2) con investigadores pertenecientes al grupo y dos (2) con el líder del grupo más un investigador acompañante con conocimientos en SC. Una característica de interés es que los líderes de estos grupos rotan según las políticas internas del grupo y por lo menos tres de ellos eran relativamente nuevos como líderes (entre uno y dos años) y no eran los mayores autores de los artículos de simulación que fueron publicados por el grupo.

Según la **Tabla 4**, se tienen las siguientes consideraciones:

- Siete grupos (G1, G2, G3, G4, G5, G7 y G10) tienen más de 30 integrantes activos para finales de 2019. De los cuales cinco (G2, G3, G4, G5 y G7) son los que más publican además de que pertenecen a categorías A1 y A. Esta relación es esperada, es decir, los grupos con mayor número de investigadores y considerados grupos de alto rendimiento, tienen más artículos de investigación publicados. Además, se presenta en dominios o disciplinas relacionadas con informática y estadística. El grupo G10 a pesar del alto número de integrantes activos, tiene pocos artículos publicados. Sin embargo, una característica importante es que todos los artículos de simulación enviados a revistas fueron publicados. Este grupo se caracteriza por hacer simulación gráfica por ser afín a su disciplina y es categoría C.
- Los grupos G9, G10 y G11, siendo de categoría C y con pocos artículos publicados en general según la información GrupLAC (Colombia), son grupos que han podido publicar la mayoría de lo enviado. Este aspecto puede indicar que ponen más atención a la calidad de lo enviado o que saben que tienen la posibilidad de que sea fácilmente publicado (se considera que la revista, sea la categoría que sea, considera la simulación realizada y el artículo escrito con aporte teórico).
- Siete grupos consideran que el 100% de los artículos de simulación que fueron enviados a evaluación fueron publicados (no se considera cuantas veces se hizo el intento)
- Se considera que la mayoría se encuentran por debajo del 50% en lo que corresponde al uso de la simulación como una de las metodologías principales. Lo que implica

que son otros métodos, diferentes a los de simulación, los que usan los grupos para hacer investigación.

Tabla 4

Grupos de investigación entrevistados, categoría del grupo, número de integrantes, artículos totales en GrupLAC (Minciencias, Colombia)

Ítem	Grupo de investigación entrevistado	Categoría del grupo (Minciencias-Colombia)	Número de Integrantes (entre 2015-2019)	Artículos publicados entre 2015-2019 (según revisión en GrupLAC-Colombia)	Publicados de los enviados a evaluación que eran de simulación (según entrevista)		Relación de publicados por simulación en relación a los totales publicados	Entrevista con investigador líder del grupo	Entrevista con investigador secundario o que acompañó al líder
1	G1	B	45	14	5	36%	70%	Si	No
2	G2	A1	70	63	2	3%	100%	Si	No
3	G3	A1	69	102	3	3%	100%	No	Si
4	G4	A1	44	47	_*	_**	_***	Si	Si
5	G5	A1	37	56	5	9%	95%	Si	No
6	G6	A	16	35	5	14%	100%	No	Si
7	G7	A	43	64	20	31%	100%	Si	No
8	G8	A	30	18	3	17%	100%	Si	No
9	G9	C	6	8	3	38%	100%	Si	No
10	G10	C	58	5	5	100%	45%	Si	No
11	G11	C	22	3	3	100%	100%	Si	Si

Una vez realizada la entrevista, se definen los reportes individuales y con estos se cruza la información entre grupos cuyas conclusiones son:

- De los 11 grupos, 8 de ellos (G1, G2, G3, G4, G5, G7, G8, G9) tiene el propósito de usar la SC como método experimental para la construcción de teoría, los otros 3 tienen un propósito de SC como antecesor de emulación (G6), SC gráfica (G10) y SC más formativa (G11).
- Los principales componentes de la SC que fortalecen la construcción de teoría son: validación interna, verificación, validación externa, juicios de expertos en la interpretación de los resultados, modelos precisos, muchas combinaciones de variables, iteraciones y escenarios, calibrar bien el modelo (establecimiento de parámetros), teoría inicial bien establecida, tener replicabilidad, proceso iterativo riguroso, tener clara la pregunta y las variables que la resuelven, formación estadística.

- Los principales componentes de la SC que afectan la construcción de teoría son: falta de conocimiento en SC como método, no conocimiento profundo del fenómeno, mala calidad del dato real, mala interpretación o interpretación subjetiva, no tener el software y el hardware apropiado, no contar con un diseño robusto desde el inicio, violar las suposiciones, no compartir el código, no escoger la metodología adecuada según la pregunta, falta de recursos para estudiantes investigadores de manera continua, la normatividad burocrática institucional.
- Las SC tiene poca contribución en el total de las publicaciones realizadas por los grupos, aunque todos los artículos con SC se publicaran en su mayoría, aunque fueran rechazados en el primer intento (ver **Tabla 4**). A nivel de contribución por citas, se diría que solo un artículo, del grupo G7, hace un aporte de consideración.

Si estas conclusiones se consideran desde las cuatro temáticas principales, se pueden definir las buenas prácticas para aplicación de simulación computacional en creación de teoría, así:

a) Interés y uso en la simulación computacional

Se tienen como tendencia en los grupos de investigación para resolver problemas prácticos o del mundo real. Su uso como método experimental lo define principalmente en primera medida la pregunta de investigación, la capacidad de cálculo y el poder acortar tiempos y costos en las investigaciones. Lo consideran una buena práctica que da confiabilidad al proceso investigativo, permite aumentar la complejidad y avanzar en la generación de conocimiento. La colaboración con otros grupos de investigación (aproximadamente el 50% de los grupos lo hace) es un asunto de interés común entre individuos en los grupos de investigación, y no es algo normalizado e institucionalizado; principalmente se da en grupos que conocen bien el fenómeno o sistema de estudio y aquellos que tienen capacidades en estadística o herramientas computacionales como la SC. Ningún grupo desarrolla software o tiene un marco de trabajo (*framework*) propio, utilizan paquetes comerciales o de código abierto (este último por cuestiones económicas, lo cual también limita el desarrollo de teoría porque no pueden trabajar con sistemas altamente complejos). De los 11 grupos entrevistados, mencionan y utilizan alrededor de 19 tipos de simulación, siendo los más

nombrados el de simulación basadas en agentes, dinámica de sistemas, sistemas multiagentes y simulación estadística.

Como buenas prácticas, es decir, una iniciativa de actuación exitosa que mejora los resultados de la investigación (Ministerio de educación, 2015) se tiene en este tema:

- La pregunta de investigación es la que mejor define el método de simulación a utilizar. Se debe poner especial atención a ella para escoger la mejor opción de las diferentes alternativas mencionadas y conocidas por los grupos de investigación.
- Tener una buena documentación del software es indispensable (ya sea desarrollado por el grupo, de uso libre, de código abierto o comercial). Así mismo tener software o desarrollar algoritmos que sean capaces de llevar el modelo conceptual a un modelo computacional lo más fiable posible.

b) Confiabilidad de la metodología

La confiabilidad de la metodología depende de varios métodos, ya sean usados de forma individual o combinados. La validación es el método más extendido y reconocido en todos los grupos, aunque solo un grupo desglosa está en validación conceptual y operacional. La más conocida es la validación (los 11 grupos la practican), la cual consiste en usar datos reales en el modelo y luego de hacer la simulación, los resultados finales se constatan como iguales a lo que muestra la realidad. Adicional al método anterior, se encuentra el de la verificación, el cual implica que el modelo pasado al lenguaje de programación no se distorsiona y hace lo que está definido en el modelo conceptual, sólo 4 grupos la reconocen y la asumen diferente a la validación. Los grupos están de acuerdo en que los métodos de validación y verificación hacen más exigente y laborioso el proceso de investigación y acerca más al investigador a desarrollar y mejorar el diseño de experimentos o escenarios que quiere estudiar. También permiten madurar la confianza que depositan en la herramienta por el conocimiento que logran de ella. Un factor que puede dar más confianza al crecimiento o desarrollo de conocimiento es tener un protocolo de almacenamiento de datos inicialmente por el grupo de investigación y propender por uno institucional. En la actualidad ningún grupo lo tiene y solo son conocidos por unos pocos investigadores o cuando se publica el estudio. Tampoco los datos resultantes de la simulación son guardados institucionalmente.

En cuanto a los supuestos y la racionalidad, que son una parte importante de la metodología de la simulación, los grupos no señalan algo específico o concreto de los métodos o técnicas que usan. Pero se menciona que deben ser muy definidos los criterios que llevan a la utilización de la simulación y que se deben usar variables importantes que se puedan medir para responder la o las preguntas de investigación. Utilizar datos confiables y calibrados, tanto en su adquisición como en los límites reales. Hacer un proceso de iteración de la simulación y la modelación, y volver arte la construcción de los modelos.

Se consideran buenas prácticas de este apartado:

- Realizar un proceso altamente iterativo y rigurosos de verificación y validación, tener datos de calidad, conceptos teóricos bien fundamentados así sea incipientes, poder replicar el experimento, no forzar los resultados y evitar la subjetividad, tener experticia y hacer una rigurosa construcción del modelo, no violar las suposiciones, no poner toda la confianza en la herramienta de simulación (software), tener ética profesional y que no haya duda en los parámetros usados.
- Tener un grupo de investigadores con experiencia y conocimiento. Gran parte debe partir de la gestión de conocimiento que se haga al interior y de las decisiones que tome el líder del grupo.

c) Limitaciones y debilidades

Sin duda, la alta rotación de los miembros del grupo de investigación, quienes generalmente son estudiantes de maestría y doctorado, cuyo proceso de investigación es más de tipo formativo, impacta la producción de nuevo conocimiento y/o teoría. Por su mismo carácter formativo, estos grupos académicos no tienen condiciones adecuadas para darles continuidad a los investigadores una vez graduados. También se tienen limitaciones económicas para la adquisición de datos, por una parte, si son longitudinales y en campo; y por otra, por la falta de acceso a bases de datos en donde puedan encontrarlas. Así mismo hay pocos recursos financieros para apoyo de investigadores de maestría y doctorado. Falta de una adecuada formación en matemática en los investigadores para construcción de modelos estables, precisos y óptimos. Y puede darse la falta

de una adecuada gestión de conocimiento en el interior del grupo de investigación. La normatividad y burocracia institucional también afectan el uso y la producción investigativa por medio de la simulación.

Otro aspecto que impacta, tiene que ver con la interpretación de los resultados de la simulación. Estos se ven limitados por el conocimiento de los investigadores, tanto del fenómeno, como del proceso de simulación que se tenga; y en la falta de un diseño experimental robusto, que abarque numerosas simulaciones, diferentes tipos de parametrizaciones, combinación de variables y combinación de escenarios. Difícilmente quien no haya participado en el proceso de la construcción del modelo podrá tener una interpretación adecuada de los resultados. La estadística o tener relación con grupos o investigadores de estadística ayuda a disminuir las limitaciones en la interpretación.

En cuanto a la ayuda que puedan prestar nuevas tecnologías de tipo gráfico como la realidad aumentada y la realidad virtual para la interpretación de los resultados de la simulación; diez (10) grupos de investigación si han escuchado de ellas, pero no la usan. Un (1) grupo (G10) la ha usado como una herramienta, pero más como una contribución de los estudiantes que una técnica o método incorporada al grupo y con el fin de ayudar a la interpretación. Otros grupos (G4, G7, G9, G11) la consideran de potencial uso y ayuda en las interpretaciones. El grupo G1 considera que la estadística (y sus gráficas) siguen siendo el método más importante.

Se consideran buenas prácticas de este apartado:

- El carácter formativo de los grupos de investigación académicos es una debilidad en el contexto que no pueden tener investigadores con mayor permanencia en los grupos una vez graduados. Se considera una buena práctica tenerlos más tiempo disponibles, pero no permanentes.
- La interpretación de los resultados de la simulación deben hacerla aquellos que han participado en el proceso del modelo, conozcan el fenómeno y estén más capacitados en matemática, estadística y en herramientas computacionales.

d) Uso de los resultados

Aunque la solución del problema es parte del interés de los grupos de investigación, la publicación de artículos es uno de sus principales intereses y uno de los productos preferidos. En los grupos entrevistados, siete (7) han logrado publicar todos los artículos con SC. No se especifica en cuantos intentos, pero varios de ellos lo intentan hasta que lo logran. El grupo G10 es el que tiene menos logros. El grupo G5 no indica la cantidad, solo da un porcentaje. Los grupos G2, G5 y G7 son los que más publican artículos con SC; dos de ellos (G2 y G5) se encuentran en el dominio de los sistemas, computación o tecnología de la información; el tercero (G7) es de estadística.

Para publicar, principalmente se debe conocer la metodología, normas y estructura de la revista en la que se quiere publicar (las formas de llegar a ellas son variadas: desde aquellas que manejan la temática a aquellas que son referenciadas por otros investigadores en el voz a voz o porque anteriormente se había publicado en ellas). Que sea de categoría mundial y tenga prestigio, que valore el enfoque de SC. Si por alguna razón este es devuelto o no considerado por esa revista para publicación, generalmente la retroalimentación es valiosa por lo que se ajusta el artículo y se envía a otra revista de similar categoría. Se realiza este proceso hasta que sea publicado. El proceso es realizado si la calidad de la investigación, trabajo de grado o tesis se considera novedosa y se considera que puede ser publicado. El objetivo inicial siempre es una revista de alto impacto. De hecho, este procedimiento, indica que el impacto teórico es difícilmente dimensionado, y la rigurosidad de la investigación depende de diferentes factores (entre ellos llevar una buena metodología de simulación). Pero a pesar de las limitaciones que se indican y parecen ser afines a los grupos de investigación, existe una política de gestión de conocimiento que permite que los grupos sean productivos a nivel de artículos y sustentables en la producción resultados. De alguna forma basados en los intereses, la experiencia y conocimiento de los docentes investigadores

Por otra parte, se debe seguir el método científico de manera clara (datos de calidad, un método de experimentación robusto y conocer adecuadamente el objeto de estudio y los vacíos en que se puede aportar), con procedimientos estadísticos apropiados, usando buenas prácticas para publicar (conceptos claros, hallazgos definidos, figuras, tablas, uso de buen inglés, entre otros). Complementar la revisión por todos los autores. Puede ser que haya una persona que encabeza la escritura, pero los demás deben hacer revisión y ajuste.

Todos los grupos concuerdan que son las citas las que pueden indicar que sus investigaciones con simulación son usadas. Dos grupos (G8 y G9) mencionan el h-index como un indicador a tener en cuenta. Dos grupos (G2 y G11) indican que la validación debe ser en campo o que los resultados sean físicamente evidenciables, lo cual es la mejor forma de probar la teoría salida de la investigación. Otro aspecto es que reciben solicitudes para dar información por diferentes medios (teléfono, correos electrónicos, reuniones) o les hacen invitaciones para presentar la metodología, o hacen jornadas de presentación de los productos de simulación o actividades como ser jurado para tesis de simulación, entre otras.

Se consideran buenas prácticas de este apartado:

- Tratar de publicar en una revista que valore el enfoque de SC, que tenga prestigio y sea de categoría mundial.
- Enviar el artículo inicialmente a revistas de alto impacto y si por alguna razón este es devuelto o no es considerado por esa revista para publicación, usar la retroalimentación que hacen para ajustar el artículo según las observaciones y enviar a otra que se considera aceptable.

Este apartado también ofrece una conclusión que refiere a la dificultad de la aplicación del método, por la cantidad de pasos en su ejecución, todos con alto impacto en la teoría que surge del proceso.

Conclusiones

En este documento se realizó el análisis de los artículos publicados y la identificación de buenas prácticas cuando se usa SC para creación de teoría por parte de grupos de investigación de una sede de una de las principales universidades de Colombia. El estudio encontró que la simulación está arraigada como una práctica experimental para la generación de teoría al mismo nivel epistemológico que cualquier otro tipo de experimentación, pero con características

diferenciadas y sustanciales en la aplicación de la metodología, lo que conlleva a grandes dificultades para cada caso que se quiera solucionar.

La aplicación de una metodología basada en la simulación computacional (SC), implica, que, a partir de la experimentación virtual del fenómeno, se puedan entender las características de comportamiento reales en el modelo (en patrones hasta el momento no conocidos) y obtener datos (información) que a partir de la interpretación apropiada pueda crear teoría. La característica principal de esta nueva teoría es que puede ser una teoría base, no irruptora, principalmente para seguirla desarrollando. Y su contribución teórica sólo puede ser definida parcialmente cuando se publican sus resultados en revistas internacionales de alto impacto.

La calidad y racionalidad de las suposiciones, el uso de la verificación y la interpretación de los resultados definen gran parte de la confiabilidad de la metodología y se consideran buenas prácticas en el uso de la SC. Sin embargo, los grupos de investigación tienen muy limitado su uso, lo que impide perfeccionar los resultados de las investigaciones y tener mayores posibilidades de publicación.

Se tiene como buena práctica la validación, lo que está muy relacionado con la experticia de los investigadores en la construcción de modelos en general. Por el contrario, la verificación, que tiene que ver con los modelos computacionales, según el contexto de SC, no es muy conocida e implícitamente parece cargada a la aplicación informática (software), lo que la hace un concepto difuso para los grupos y de gran incidencia en la creación de teoría por su impacto en las anomalías o patrones emergentes, por lo que no es recomendable que esta sea asumida implícitamente en el software o la aplicación usada. En la medida que este se conceptualiza dentro de los integrantes del grupo de investigación, podría significar una mayor inclinación a desarrollar aplicaciones o un marco de trabajo de software (*framework*) propio que pueda explicar el fenómeno que se estudia y poder reconocer aquellos patrones emergentes, darles sentido a los resultados y tener mayor opción de crear teoría. Sin embargo, este método de confiabilidad en la metodología de la SC se debe profundizar en estudio.

El uso de la simulación se debe dar bajo el siguiente compendio de buenas prácticas: realizar un proceso altamente iterativo y rigurosos de verificación y validación, tener datos de calidad, conceptos teóricos bien fundamentados así sea incipientes, poder reproducir el experimento, no forzar los resultados y evitar la subjetividad, tener experticia y realizar una rigurosa construcción del modelo, no violar las suposiciones, no poner toda la confianza en la aplicación informática y tener bien documentado el software, tener ética profesional y que no haya duda en los parámetros aplicados, además que sea una publicación fidedigna. Todo ello sin olvidar el carácter formativo de los grupos de investigación quienes deben ser bien dirigidos y preparados, especialmente por las decisiones que tomen los líderes de los grupos de investigación.

Recomendaciones

Los métodos conocidos, tradicionales y confiables en la comprensión de los resultados de la simulación y en especial de la visualización, siguen recayendo en la estadística. Es necesario explorar las nuevas alternativas tecnológicas de visualización de los resultados de la simulación y su incidencia para encontrar patrones de comportamiento no conocidos mediante otras técnicas de análisis y representación de forma similar a como lo plantean Chandrasekharan y Nersessian (2015).

Referencias

- Bacharach, S. B. (1989). *Organizational Theories : Some Criteria for Evaluation What Theory Is Not : Data , Typologies , and Metaphors*. 14(4), 496-515.
- Barney, J. (2018). *Editor's Comments: Positioning a Theory Paper For Publication*. 43(3), 345-348. <https://doi.org/10.5465/amr.2018.0112>
- Beisbart, C. (2012). How can computer simulations produce new knowledge? *European Journal for Philosophy of Science*, 2(3), 395-434. <https://doi.org/10.1007/s13194-012-0049-7>
- Borsboom, D., Van der Maas, H. L. J., Dalege, J., Kievit, R. A. y Haig, B. D. (2021). Theory Construction Methodology: A Practical Framework for Building Theories in Psychology. *Perspectives on Psychological Science*, 16(4), 756-766. <https://doi.org/10.1177/1745691620969647>
- Cabrera A, G., Molina M, G. y Pérez R, P. (2009). Teoría en investigaciones de posgrado de la Escuela de Salud Pública de la Universidad del Valle, Colombia, 1990-2004. *Revista Facultad*

- Nacional de Salud Pública*, 27(3), 317-321.
- Calderón Hernández, G. (2014). *Generación de conocimiento en los grupos élite de investigación en administración en Colombia* (U. N. de Colombia y V. de Investigación (eds.); Primera ed). ASCOLFA; Universidad Nacional de Colombia.
- Carlile, P. R. y Christensen, C. M. (2011). *Ciclos de la construcción de teorías en la investigación sobre gerencia* (N.º 05-057; versión 6.0, 6-1-2005, Vol. 2005).
- Cash, P. (2020). Where next for design research? Understanding research impact and theory building. *Design Studies*, 68, 113-141. <https://doi.org/10.1016/j.destud.2020.03.001>
- Chanda, S. S. y Ray, S. (2015). Formal theory development by computational simulation modeling: a tale of two philosophical approaches. *Decision*, 42(3), 251-267. <https://doi.org/10.1007/s40622-015-0096-y>
- Chandrasekharan, S. y Nersessian, N. J. (2015). Building Cognition: The Construction of Computational Representations for Scientific Discovery. *Cognitive Science*, 39(8), 1727-1763. <https://doi.org/10.1111/cogs.12203>
- Davis, J. P., Eisenhardt, K. M. y Bingham, C. B. (2007). Developing theory through simulation methods. *Academy of Management Review*, 32(2), 480-499. <https://doi.org/10.5465/AMR.2007.24351453>
- Diallo, S. Y., Gore, R. J., Padilla, J. J. y Lynch, C. J. (2015). An overview of modeling and simulation using content analysis. *Scientometrics*, 103(3), 977-1002. <https://doi.org/10.1007/s11192-015-1578-6>
- Diallo, S. Y., Padilla, J. J., Bozkurt, I. y Tolk, A. (2013). Modeling and Simulation as a Theory Building Paradigm. *Ontology, Epistemology, & Teleology for Model & Simulation*, 44, 193-206. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31140-6_10
- Durán, J. M. (2018). Computer simulations in science and engineering (Concepts - Practices - Perspectives). En *The Frontiers Collection*. Springer Nature Switzerland AG. https://doi.org/https://doi.org/10.1007/978-3-319-90882-3_11
- Durán, J. M. (2021). A Formal Framework for Computer Simulations: Surveying the Historical Record and Finding Their Philosophical Roots. *Philosophy and Technology*, 34(1), 105-127. <https://doi.org/10.1007/s13347-019-00388-1>
- Gilbert, N. y Troitzsch, K. G. (2005). *Simulation for the social scientist* (Open Unive).
- González, B. y Busto, M. (1998). Begoña González-Busto Múgica. *La dinámica de sistemas como metodología para la elaboración de modelos de simulación*. <https://bit.ly/2ZwmYFh>
- Gould, H., Tobochnik, J. y Christian, W. (2016). *An Introduction to Computer Simulation Methods - Applications to physical* (Tercera). <https://doi.org/10.1119/1.2219401>
- Harrison, J. R., Lin, Z., Carroll, G. R. y Carley, K. M. (2007). *Simulation Modeling in organizational and management reserach*. 412, 1-43.
- Hazhir, R. y Sterman, J. D. (2012). Reporting guidelines for simulation- based research in social

- sciences. *System Dynamics Review*, 28(4), 396-411.
<https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1002/sdr.1481>
- Hester, P. T. y Tolk, A. (2010). Applying methods of the M&S spectrum for complex systems engineering. *Spring Simulation Multiconference 2010, SpringSim'10, May 2014*.
<https://doi.org/10.1145/1878537.1878615>
- Hollweck, T. (2016). Robert K. Yin. (2014). Case Study Research Design and Methods (5th ed.). Thousand Oaks, CA: Sage. 282 pages. *The Canadian Journal of Program Evaluation*.
<https://doi.org/10.3138/cjpe.30.1.108>
- Hoyos, E., López, D. y Alvarez, H. (2016). A phenomenologically based material flow model for friction stir welding. *Materials and Design*, 111, 321-330.
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.09.009>
- Levine, J. M. y Moreland, R. L. (1990). Progress in small group research. *Annual Review of Psychology*, 41(1), 585-634. <https://doi.org/10.1146/annurev.ps.41.020190.003101>
- López, S., Arias, V., Jiménez, M. M. y Estrada, J. A. (2016). Modelación Y Simulación Computacional En La Enseñanza De La Biología: Un Campo De Estudio Con Mucho Potencial Pero Poco Explorado. *Revista Bio-grafía Escritos sobre la biología y su enseñanza*, 8(14), 101. <https://doi.org/10.17227/20271034.vol.8num.14bio-grafia101.115>
- Lynham, S. A. (2002). The General Method of Theory-Building Research in Applied Disciplines. *Advances in Developing Human Resources*, 4(3), 221-241.
<https://doi.org/10.1177/1523422302043002>
- Maldonado, C. E. y Gómez Cruz, N. A. (2010). *Modelamiento y simulación de sistemas complejos*. Universidad del Rosario.
- Martínez Marín, S. J. y Arango Aramburo, S. (2017). Modelo de simulación dinámica para evaluar la inversión en capacidades de innovación tecnológica en la Industria Colombiana de Software. *Espacios*, 38(9), 3.
- Ministerio de educación, cultura y deporte. (2015). *Sobre el concepto de buena práctica* (p. 2). Consejo Escolar del Estado.
<https://www.educacionyfp.gob.es/dctm/cee/encuentros/buenapractica.pdf?documentId=0901e72b815f9789>
- Morrison, M. (2009). Models, measurement and computer simulation: The changing face of experimentation. *Philosophical Studies*, 143(1), 33-57. <https://doi.org/10.1007/s11098-008-9317-y>
- Padrón G., J. (1992). *Aspectos diferenciales de la investigación educativa. Modelo y patrones de variabilidad desde la perspectiva interteórica de la acción, la semiótica y el texto*. Universidad Nacional Experimental Simón Rodríguez.
<http://padron.entretemas.com.ve/ModeloVIE-v1.pdf>
- Poile, C. y Safayeni, F. (2016). Using computational modeling for building theory: A double edged sword. *Jasss*, 19(3). <https://doi.org/10.18564/jasss.3137>

-
- Robinson, S. (2020). Conceptual modelling for simulation: Progress and grand challenges. *Journal of Simulation*, 14(1), 1-20. <https://doi.org/10.1080/17477778.2019.1604466>
- Rodriguez Zoya, L. y Roggero, P. (2014). La modelización y simulación computacional como metodología de investigación social. *Revista Latinoamerica Polis*, 39, 22.
- Salazar, J. C. (2009). Analysis and Design of Experiments Applied To Simulation Studies. *Dyna*, 76(Design of experiments), 249-257.
- Suppes, P. (1967). What is a scientific theory? En *Philosophy of science today* (pp. 55-67). Basic Books Inc. <https://doi.org/10.1017/9781139046893.004>
- Torres Vélez, Á. (2019). *Modelación y simulación basada en agentes en ciencias sociales: una aproximación al estado del arte*.
- Whetten, D. A. (1989). What constitutes a theoretical contribution? *Academy of Management Review*, 14(4), 490-495.
- Winsberg, E. (2009). Computer Simulation and the Philosophy of Science. *Philosophy Compass*, 4(5), 835-845. <https://doi.org/10.1111/j.1747-9991.2009.00236.x>