

Sistema adaptativo complejo y el desarrollo de competencias multidimensional en la formación profesional

Complex Adaptive System and the Development of Multidimensional Skills in Vocational Training

Sistema adaptativo complexo e desenvolvimento de competências multidimensionais na formação profissional

Jorge Hernán Suaza-Jiménez* 

Forma de citar este artículo

Suaza-Jiménez, J. H. (2026). Sistema adaptativo complejo y el desarrollo de competencias multidimensional en la formación profesional. *Tecné Episteme y Didaxis: TED*, (60), e23677, <https://doi.org/10.17227/ted.num60-23677>

Ph.D. en Pensamiento Complejo. Docente investigador, Facultad de Ingenierías, Instituto Tecnológico Metropolitano (ITM), Medellín, Colombia.
jorgesuaza@itm.edu.co

Resumen

La transformación tecnológica acelerada y la complejidad creciente en lo social y lo laboral demandan urgentemente repensar los modelos formativos tradicionales. Los profesionales de hoy deben estar preparados para operar en escenarios definidos por la incertidumbre y el cambio constante. En este contexto, los sistemas adaptativos complejos (SAC) ofrecen una perspectiva integradora para desarrollar competencias multidimensionales, que combinan las esferas cognitiva, emocional, ética y contextual del saber actuar.

Este artículo propone una reflexión y una aplicación del enfoque SAC en la formación, destacando su potencial para diseñar experiencias de aprendizaje dinámicas, sensibles a la diversidad estudiantil y a las exigencias del entorno. El diseño metodológico se basó en un estudio cuasi-experimental con análisis correlacional y prueba *T-student* para evaluar el desarrollo de competencias multidimensionales.

Se parte de la premisa de que el aprendizaje no es un proceso lineal, sino una red de interacciones y de autoorganización. Por ello, se presenta una estrategia pedagógica inspirada en la lógica compleja, donde el estudiante asume un rol activo como agente que se adapta y transforma su entorno formativo.

El trabajo se alinea con el proyecto MIRU, una iniciativa que promueve una educación incluyente y personalizada al reconocer las trayectorias singulares de los estudiantes y su potencial para resolver problemas complejos. Los resultados obtenidos indican que integrar principios de adaptabilidad y no linealidad en las prácticas educativas logra potenciar significativamente habilidades esenciales. Entre ellas destacan el pensamiento crítico, la autonomía, la creatividad y la capacidad de transferir los aprendizajes a contextos reales y demandantes.

Artículo de reflexión

Fecha de recepción: 28/08/2025
Fecha de aprobación: 09/03/2026
Fecha de publicación: 01/07/2026

Palabras clave

teoría de la educación; competencias del docente; formación profesional; aprendizaje; pensamiento crítico; tecnología

Abstract

The accelerated technological transformation and increasing complexity in social and professional life urgently demand a rethinking of traditional formative models. Today's professionals must be prepared to operate in scenarios defined by uncertainty and constant change. In this context, Complex Adaptive Systems (CAS) offer an integrative perspective for developing multidimensional competencies that combine the cognitive, emotional, ethical, and contextual spheres of effective action.

This article proposes a reflection on an application of the CAS approach in training, highlighting its potential for designing dynamic learning experiences that are sensitive to student diversity and the demands of the environment. The methodological design was based on a quasi-experimental study with correlational analysis and a Student's *t*-test to evaluate the development of multidimensional competencies.

It starts from the premise that learning is not a linear process, but rather a network of interactions and self-organization. Therefore, a pedagogical strategy inspired by complex logic is presented, where the student assumes an active role as an agent who adapts to and transforms their learning environment.

This work aligns with the MIRU project, an initiative that promotes inclusive and personalized education by recognizing students' unique learning paths and their potential to solve complex problems. The results obtained indicate that integrating principles of adaptability and nonlinearity into educational practices significantly enhances essential skills. These include critical thinking, autonomy, creativity, and the ability to transfer learning to real and demanding contexts.

Keywords

educational theory; teacher competencies; professional development; learning; critical thinking; technology

Resumo

A transformação tecnológica acelerada e a crescente complexidade da vida social e profissional exigem urgentemente uma reformulação dos modelos tradicionais de formação. Os profissionais de hoje devem estar preparados para atuar em cenários definidos pela incerteza e pela mudança constante. Nesse contexto, os sistemas adaptativos complexos (SAC) oferecem uma perspectiva integrativa para o desenvolvimento de competências multidimensionais que combinam as esferas cognitiva, emocional, ética e contextual da ação efetiva.

Este artigo propõe uma reflexão e aplicação da abordagem SAC na formação, destacando seu potencial para o desenvolvimento de experiências de aprendizagem dinâmicas, sensíveis à diversidade dos alunos e às demandas do ambiente. O desenho metodológico baseou-se em um estudo quase-experimental com análise correlacional e teste *t* de *Student* para avaliar o desenvolvimento de competências multidimensionais.

Parte-se da premissa de que a aprendizagem não é um processo linear, mas sim uma rede de interações e auto-organização. Portanto, apresenta-se uma estratégia pedagógica inspirada na lógica complexa, na qual o aluno assume um papel ativo como agente que se adapta e transforma seu ambiente de aprendizagem.

Este trabalho está alinhado com o projeto MIRU, uma iniciativa que promove a educação inclusiva e personalizada, reconhecendo as trajetórias de aprendizagem únicas dos alunos e seu potencial para resolver problemas complexos. Os resultados obtidos indicam que a integração dos princípios da adaptabilidade e da não linearidade nas práticas educacionais aprimora significativamente habilidades essenciais, como o pensamento crítico, a autonomia, a criatividade e a capacidade de transferir a aprendizagem para contextos reais e desafiadores.

Palavras-chave

teoria educacional; competências docentes; desenvolvimento profissional; aprendizagem; pensamento crítico; tecnologia

Introducción

En las últimas décadas, el estudio de los sistemas adaptativos complejos (SAC) ha ganado relevancia en diversas disciplinas, entre ellas la educación y la formación profesional. Los SAC se caracterizan por estar compuestos por múltiples elementos interconectados que interactúan de manera no lineal, lo que da lugar a comportamientos emergentes y adaptativos. Este enfoque permite comprender cómo las organizaciones educativas pueden evolucionar y adaptarse en entornos cambiantes y complejos.

La aplicación de la teoría de los SAC en el ámbito educativo ha sido explorada por diversos autores. Por ejemplo, Hernández Cansino *et al.* (2022) señalan que las instituciones educativas pueden entenderse como sistemas adaptativos complejos, en los cuales las interacciones entre estudiantes, docentes y contextos generan dinámicas emergentes que influyen en los procesos de enseñanza y aprendizaje. Asimismo, Martínez Moncaleano *et al.* (2023) sostienen que las organizaciones, incluidas las educativas, deben concebirse como sistemas abiertos y no lineales capaces de autoorganizarse y adaptarse a las condiciones del entorno.

En este contexto, la formación profesional enfrenta el desafío de preparar a los individuos para desenvolverse en entornos laborales caracterizados por la incertidumbre, la complejidad y el cambio constante. Particularmente en campos como la ingeniería y la tecnología, el enfoque SAC resulta idóneo para modelar fenómenos complejos en el aula, lo que facilita la enseñanza de sistemas dinámicos y el diseño de sistemas tecnológicos resilientes. La incorporación de enfoques basados en los SAC en los programas de formación profesional puede favorecer el desarrollo de competencias multidimensionales, tales como el pensamien-

to crítico, la adaptabilidad y la capacidad de aprendizaje continuo. Estas competencias son esenciales para que los profesionales respondan de manera efectiva a las demandas de un mundo laboral en constante transformación.

El presente artículo tiene como objetivo explorar la aplicación de los sistemas adaptativos complejos en el diseño y desarrollo de programas de formación profesional. Se analizarán las características fundamentales de los SAC y su relevancia en el ámbito educativo, así como las implicaciones que presentan para la formación de competencias multidimensionales en los profesionales del siglo XXI. A través de una revisión de la literatura reciente y del análisis de casos prácticos, se busca ofrecer una perspectiva integral sobre cómo los principios de los SAC pueden enriquecer los procesos de enseñanza y aprendizaje en la formación profesional.

En las secciones siguientes se presentan los conceptos clave asociados a los sistemas adaptativos complejos, seguidos de una discusión sobre su implementación en programas de formación profesional. Posteriormente, se analizan los resultados obtenidos en estudios de caso y se concluye con una reflexión sobre las implicaciones de adoptar este enfoque en la educación del siglo XXI.

Antecedentes

La aplicación de la teoría de la complejidad, y en particular de los sistemas adaptativos complejos (SAC), a los procesos educativos ha emergido como una de las líneas de investigación más fecundas y pertinentes en los últimos años. Este enfoque integrador reconoce que la formación de un profesional es, por naturaleza, un proceso no lineal y autoorganizado. En lugar de concebir al estudiante como un integrante pasivo, el enfoque SAC lo sitúa como un agente activo dentro de una red de

interacciones (Castillo-Villanueva y Velázquez-Torres, 2024; Meza *et al.*, 2019). Esta perspectiva ha contribuido a cuestionar la idea de un currículo estático y ha promovido estructuras formativas más fluidas y dinámicas, capaces de evolucionar al mismo ritmo que su entorno. Autores como Quintanar-Casillas y Hernández-López (2022) han realizado revisiones sistemáticas que consolidan el papel de los modelos de aprendizaje adaptativo —intrínsecamente ligados a la lógica de los SAC— y destacan su potencial para personalizar las trayectorias educativas. Estos trabajos recientes muestran que la tecnología y la lógica compleja no solo son compatibles, sino que resultan esenciales para generar entornos de aprendizaje que se ajusten a las trayectorias singulares de los estudiantes.

La literatura reciente subraya que las competencias profesionales ya no pueden limitarse a la esfera puramente cognitiva o técnica (*hard skills*). La Cuarta Revolución Industrial (Industria 4.0) y la transformación digital asociada han provocado que muchas de las habilidades valoradas en el mercado laboral tradicional se vuelvan obsoletas con rapidez (Rojas-Arenas *et al.*, 2021 ; Escobar Terán *et al.*, 2023). En consecuencia, diversos estudios han documentado la necesidad de integrar un conjunto de competencias multidimensionales o competencias del siglo XXI que operen en las esferas emocional, ética y contextual del *saber actuar* (Castellanos-Monroy y Rojas-Villamil, 2023).

El desarrollo de la competencia digital en el profesorado y en los estudiantes constituye, por ejemplo, un objeto de estudio prioritario (Bautista Cuello *et al.*, 2020; Reyes Lucas y Morejón López, 2025; Montero-Delgado *et al.*, 2020). No obstante, el foco de investigación se ha desplazado desde la habilidad de usar herramientas —dimensión técnica— hacia la capacidad de utilizarlas para fomentar el pensamiento crítico, la colaboración y la resolución de problemas complejos (Castellanos-Monroy y Rojas-Villamil, 2023).

En este contexto, la autonomía y la autoeficacia se perfilan como competencias transversales críticas. Investigaciones recientes (Sarýçoban, 2020; Sáez-Delgado *et al.*, 2020) resaltan que la creencia de un individuo en su propia capacidad —autoeficacia— influye directamente en su persistencia y motivación frente a los desafíos, un factor indispensable en escenarios de incertidumbre. Por esta razón, la formación debe diseñarse intencionalmente para potenciar dicha autonomía, lo que permite que el estudiante se adapte a su entorno y lo transforme, al asumir el papel de agente activo que propone el enfoque SAC.

Por otra parte, la crítica fundamental a la formación tradicional sostiene que el aprendizaje no constituye una secuencia preestablecida, sino una red de interacciones. Este concepto de no linealidad encuentra respaldo en investigaciones sobre progresiones del aprendizaje y construcción de mapas de competencias (Quintanar-Casillas y Hernández-López, 2022; Aparicio-Gómez y Aparicio-Gómez, 2024; Parra-Rojas, 2023). La cuestión central reside en cómo se estructuran las experiencias formativas para asegurar la transferencia de conocimientos y habilidades a contextos reales y exigentes.

La eficacia de los modelos educativos se evalúa cada vez más en función de la capacidad del egresado para movilizar su conocimiento en situaciones nuevas, un desafío inherente a un mundo profesional en constante evolución. Esto exige superar la simple memorización de contenidos y centrarse en el desarrollo de habilidades esenciales como la creatividad y el pensamiento crítico (Castellanos-Monroy y Rojas-Villamil, 2023).

A pesar de esta sólida base teórica, que sitúa a los sistemas adaptativos complejos como el marco idóneo para una formación profesional orientada al siglo XXI y que ha permitido definir con claridad la necesidad de competencias multidimensionales y la validez de modelos educativos no lineales, persiste un vacío relevante. Si bien la investigación reciente ha validado la eficacia de integrar principios de adaptabilidad y autoorganización para potenciar habilidades como el pensamiento crítico y la autonomía, todavía no existen trabajos rigurosos y extensos que evalúen de manera sistémica el impacto de un currículo íntegramente basado en la lógica SAC. En particular, se requiere una metodología de evaluación validada que no se limite a medir resultados individuales de aprendizaje —como la adquisición de una competencia específica—, sino que permita analizar la emergencia y la resiliencia del sistema formativo en su conjunto frente a disrupciones externas. Este desafío constituye un eje central que requerirá el desarrollo de una propuesta metodológica innovadora en esta investigación.

Marco teórico

En el contexto educativo actual, caracterizado por la volatilidad, la incertidumbre y la acelerada evolución tecnológica, los sistemas adaptativos complejos (SAC) se consolidan como una herramienta teórica y metodoló-

gica clave para comprender y transformar los entornos de enseñanza-aprendizaje. Un SAC está conformado por múltiples agentes o elementos que interactúan entre sí y generan comportamientos emergentes no lineales y adaptativos (Martínez Moncaleano *et al.*, 2023). Esta propiedad permite que el sistema no solo reaccione ante el entorno, sino que aprenda de él y se transforme de manera autoorganizada frente a los cambios.

Los SAC se distinguen por su capacidad de aprendizaje distribuido y por su dinámica no determinista. Tal como sostienen Jacobson y Wilensky (2006), en los entornos formativos los elementos que integran el sistema —estudiantes, docentes, contenidos, tecnologías y contexto sociocultural— no operan de manera aislada, sino que configuran una red de interacciones que redefine continuamente las trayectorias educativas. Esta característica convierte a las instituciones en espacios abiertos y en constante evolución, dentro de los cuales es posible identificar patrones emergentes que orientan la toma de decisiones pedagógicas.

Desde la perspectiva de los SAC, el aprendizaje deja de concebirse como un proceso lineal, secuencial y estático. Por el contrario, se entiende como un fenómeno emergente que surge de la interacción entre agentes con distintos niveles de conocimiento, experiencias previas y contextos de actuación. Esta idea es consistente con las propuestas de Morales-Ramos (2024), quienes plantean que la educación debe basarse en modelos adaptativos y personalizados que permitan a los individuos activar diversas competencias para resolver problemas reales en contextos cambiantes y multidimensionales.

Una de las principales implicaciones del enfoque SAC para la formación profesional consiste en la necesidad de transitar desde un modelo educativo centrado en la transmisión

de contenidos hacia otro basado en la construcción colaborativa del conocimiento. Esta transición requiere reconocer que el entorno educativo es un sistema vivo en el cual las soluciones pedagógicas no se imponen desde la rigidez curricular, sino que emergen de la interacción entre los actores y el medio. En esta línea, Estrada-García (2018) destaca el potencial de los SAC para impulsar la innovación educativa y el desarrollo de competencias complejas como la metacognición, el trabajo en equipo, la resolución de problemas y el pensamiento sistémico.

Finalmente, comprender los escenarios educativos como sistemas adaptativos complejos implica también replantear los mecanismos de evaluación, seguimiento y mejora. Las herramientas tradicionales resultan insuficientes para captar la riqueza y la diversidad de los aprendizajes emergentes. Por ello, se hace necesario incorporar métricas cualitativas, indicadores de interacción y evaluaciones continuas y contextualizadas que reconozcan la diversidad de trayectorias formativas. En palabras de Beresford-Dey *et al.* (2024), los modelos educativos del futuro deben articularse como sistemas abiertos, recursivos y resilientes capaces de integrar la incertidumbre como un componente estructural del proceso educativo.

En las últimas décadas, el paradigma de los sistemas adaptativos complejos (SAC) ha adquirido un papel central en la comprensión de fenómenos educativos, sociales, tecnológicos y organizacionales. Estas estructuras, caracterizadas por su capacidad de adaptación, emergencia, autoorganización y diversidad, permiten modelar procesos que evolucionan dinámicamente en función de las interacciones entre sus componentes (Mitchell, 2021; Johnson *et al.*, 2022).

Características de los sistemas adaptativos complejos

De acuerdo con Tang *et al.* (2021), los SAC presentan propiedades esenciales que los diferencian de los sistemas tradicionales o deterministas:

No linealidad y dinámica: los SAC no evolucionan hacia un equilibrio estable ni operan bajo relaciones causa-efecto lineales. Por el contrario, sus comportamientos emergen de la interacción constante entre múltiples componentes y de las condiciones cambiantes del entorno. Esto implica que pequeñas variaciones en las entradas pueden producir efectos desproporcionados en los resultados, lo que genera patrones que pueden parecer aleatorios o caóticos.

Agentes autónomos: los sistemas están compuestos por agentes independientes que toman decisiones basadas en reglas internas, ya sean físicas, sociales o cognitivas. Cada agente actúa con un grado de autonomía que le permite interactuar con el entorno y con otros agentes, lo que contribuye a la dinámica global del sistema.

Heterogeneidad de objetivos: los agentes dentro de un SAC no comparten necesariamente los mismos objetivos. De hecho, sus metas y comportamientos pueden entrar en conflicto, lo que impulsa la adaptación mutua y fomenta una

rica diversidad de comportamientos dentro del sistema. Esta tensión entre objetivos constituye una fuente clave de dinámica y evolución del sistema.

Aprendizaje emergente: a través de la experiencia y la interacción, los agentes adquieren conocimiento y modifican sus comportamientos en consecuencia. Este aprendizaje continuo permite que el sistema se adapte de manera dinámica a las condiciones cambiantes del entorno y mejore su capacidad para responder a nuevos desafíos.

Autoorganización: los patrones de comportamiento y las estructuras organizativas emergen espontáneamente de las interacciones locales entre agentes, sin necesidad de una autoridad central que los imponga. Esta propiedad permite que los SAC sean resilientes y flexibles frente a cambios en el entorno.

Ausencia de control centralizado: en los SAC no existe un único punto de control o dirección. Los comportamientos del sistema emergen de la interacción descentralizada de sus componentes. Si bien es posible influir en el sistema mediante la modificación de sus condiciones o reglas de interacción, su comportamiento global no puede controlarse de manera directa o determinista.

Estas propiedades explican por qué los SAC resultan particularmente útiles en contextos educativos: permiten simular el comportamiento de comunidades de aprendizaje, adaptarse a estilos pedagógicos diversos y facilitar entornos de enseñanza personalizados (Barabási, 2020).

Componentes de un sistema adaptativo complejo

Diversos autores han identificado componentes estructurales clave en los SAC:.

a) Desde la perspectiva de Li et al. (2023):

Agentes: Son los elementos fundamentales del sistema, dotados de autonomía y capacidad de interacción. Los agentes responden a su entorno y a otros agentes según sus propias motivaciones y estrategias, lo que influye en la dinámica global del sistema.

Estrategia: Representa la manera en que cada agente responde a su entorno y a las interacciones con otros agentes. Las estrategias pueden evolucionar con el tiempo, a medida que los agentes aprenden de sus experiencias y ajustan su comportamiento.

Población: Se refiere al conjunto de agentes o estrategias dentro del sistema. La población actúa como fuente de diversidad y aprendizaje, pues permite la exploración de diferentes comportamientos y soluciones.

Medidas de éxito: Son los criterios utilizados para evaluar la eficacia de las estrategias de los agentes en relación con sus objetivos. Estas medidas guían el proceso de selección y adaptación dentro del sistema.

Tipos: Agrupan a los agentes o estrategias que comparten características comunes, lo que facilita la comprensión y el análisis de la dinámica del sistema.

b) Desde la perspectiva de Wu y Wang (2022):

Agregación: Es el proceso mediante el cual los agentes se agrupan por similitud o mediante la recombinación de categorías, lo que da lugar a estructuras organizativas más complejas.

Estandarización: Facilita el reconocimiento y la interacción entre agentes al establecer un lenguaje común o normas compartidas que permiten la coordinación.

No linealidad: Destaca que las relaciones dentro del sistema no son proporcionales ni predecibles, lo que contribuye a la riqueza y complejidad de su dinámica.

Flujo: Se refiere a los intercambios de información, recursos o energía entre los agentes a través de redes de interacción.

Diversidad: Es la presencia de una amplia gama de agentes, comportamientos y estrategias dentro del sistema, lo que aumenta su capacidad de adaptación y resiliencia.

Modelos internos: Son representaciones cognitivas o computacionales que los agentes utilizan para anticipar las consecuencias de sus acciones y tomar decisiones informadas.

Bloques de construcción: Se refieren a los componentes modulares que los agentes combinan de manera flexible para crear nuevas estrategias o resolver problemas emergentes.

Los aportes de estos autores permiten consolidar una visión integradora sobre los componentes estructurales de los sistemas adaptativos complejos (SAC). En conjunto, sus perspectivas destacan la importancia de elementos como la autoorganización, la emergencia de patrones dinámicos, la interacción no lineal entre agentes y la capacidad de adaptación constante frente a entornos cambiantes. Esta convergencia teórica no solo reafirma la naturaleza flexible y evolutiva de los SAC, sino que también ofrece un marco valioso para su aplicación en contextos como la educación, la gestión organizacional y el desarrollo tecnológico.

Las instituciones de educación como sistemas adaptativos complejos

En los últimos años, el análisis de las instituciones educativas, particularmente las de educación superior, bajo el enfoque de los sistemas adaptativos complejos (SAC) ha adquirido una relevancia significativa en la investigación educativa contemporánea (Mitchell, 2021; Johnson *et al.*, 2022). Las instituciones educativas modernas operan en entornos marcados por la incertidumbre, el cambio acelerado y la interdependencia global, características que demandan estructuras organizativas flexibles, resilientes y capaces de autoorganizarse.

Fernández-Morante *et al.* (2022) sostienen que las instituciones de educación superior (IES) exhiben propiedades típicas de los SAC. Para identificar una IES como un sistema adaptativo complejo es necesario contextualizar sus elementos y características a partir de los conceptos propuestos por Stacey (1996), Holland (1995) y Li *et al.* (2023). En una IES, los agentes incluyen a gestores, profesores, estudiantes y personal administrativo, quienes conforman una población interdependiente. Esta población desarrolla estrategias orientadas al éxito institucional,

con el objetivo de ofrecer una enseñanza de calidad, impulsar la investigación y fomentar la vinculación con la sociedad.

La competencia central de una IES radica en su capacidad para generar, difundir y aplicar conocimiento entre las comunidades de agentes que la conforman (Li *et al.*, 2023). Este proceso se desarrolla a través de complejas redes de interacción entre estudiantes, profesores y gestores, así como entre estos y el entorno externo. La dinámica resultante es inherentemente no lineal y emergente, lo que refleja patrones de adaptación continua frente a los cambios en el contexto académico, social y tecnológico.

Johnson *et al.* (2022) señalan que los teóricos de la educación incorporan cada vez con mayor frecuencia las metáforas y los conceptos del pensamiento complejo en sus marcos conceptuales. En este sentido, Davis y Simmt (2020) destacan la utilidad del pensamiento complejo para desplazar el enfoque del aprendizaje desde el individuo hacia el colectivo social, lo que permite conceptualizar la clase como un sistema adaptativo complejo en sí misma. En este modelo, tanto los estudiantes como el docente actúan como sistemas adaptativos individuales; sin embargo, mediante interacciones locales dinámicas generan comportamientos emergentes de aprendizaje que superan las capacidades individuales. La clase, entendida como colectivo, encarna el principio de que “el todo es más que la suma de sus partes”, uno de los rasgos esenciales de los SAC.

Por otra parte, Wu y Wang (2022) proponen que las IES deben caracterizarse por su modularidad y flexibilidad para adaptarse de manera oportuna a los cambios permanentes. Este enfoque permite catalizar procesos de diálogo entre saberes formales e informales y promueve la interdisciplinariedad y la transdisciplinariedad como principios normativos y no

como excepciones. No obstante, los autores señalan que la organización tradicional de los programas académicos aún presenta rigideces estructurales que obstaculizan la adopción plena del paradigma de los SAC.

De forma complementaria, Zhou *et al.* (2020) enfatizan que, para que una IES funcione efectivamente como un SAC, debe fomentar entornos de aprendizaje adaptativos caracterizados por una estructura organizativa abierta, flujos de información bidireccionales y mecanismos de retroalimentación continua. Además, resulta fundamental promover una cultura institucional que valore la diversidad, el aprendizaje emergente y la autoorganización.

En síntesis, el enfoque de los sistemas adaptativos complejos proporciona un marco teórico sólido para comprender y orientar la evolución de las instituciones de educación en el siglo XXI. Al reconocer las IES como SAC, se enfatiza la necesidad de diseñar estructuras y procesos que faciliten la adaptación continua, el aprendizaje colectivo y la innovación permanente en contextos educativos cada vez más complejos y cambiantes.

Metodología

Esta investigación adopta un enfoque mixto de tipo cuasi experimental, con alcance descriptivo-correlacional, orientado al diseño, implementación y evaluación de una secuencia didáctica basada en el uso de los principios de los sistemas adaptativos complejos (SAC) como estrategia para fortalecer competencias multidimensionales en estudiantes de formación profesional universitaria.

Se emplearon técnicas de análisis cuantitativo para identificar patrones en el desarrollo de competencias y analizar las correlaciones entre las dinámicas de los SAC implementadas y las dimensiones evaluadas.

El estudio se realizó en dos facultades de una universidad pública de Antioquia (Colombia), con una muestra total de 210 estudiantes de pregrado pertenecientes a programas de ingeniería, administración y ciencias sociales.

Diseño de la propuesta didáctica

El diseño se estructuró en torno a tres ejes:

- Principio de SAC aplicado
- Actividad didáctica asociada
- Competencia multidimensional objetivo.

En la Tabla 1 se presenta el resumen de la planificación didáctica:

Tabla 1.

Planificación didáctica

Principio de SAC	Nivel educativo (semestre)	Actividad propuesta	Competencia trabajada
Autoorganización	3.º	Diseño colaborativo de un proyecto social autogestionado	Trabajo en equipo
Emergencia	4.º	Desarrollo de soluciones innovadoras en entornos inciertos	Creatividad e innovación
Adaptación	5.º	Simulación de gestión del cambio en contextos organizacionales	Adaptabilidad
Diversidad	6.º	Análisis de casos interdisciplinarios complejos	Pensamiento crítico
Retroalimentación continua	7.º	Creación de un modelo de mejora continua basado en <i>feedback</i>	Aprendizaje autónomo y reflexivo

Fuente: elaboración propia.

Cada principio del SAC fue seleccionado por su potencial para modelar procesos formativos que reflejan las dinámicas del entorno profesional actual. Por ejemplo, la autoorganización se trabajó como base para fomentar estructuras de liderazgo distribuido en los equipos de trabajo, mientras que la emergencia permitió explorar soluciones creativas en escenarios problemáticos no estructurados (Johnson *et al.*, 2022; Wu y Wang, 2022).

Fases de implementación

Fase I: Exploración conceptual

Los estudiantes participaron en sesiones introductorias en las que se analizaron casos reales de organizaciones y sistemas que operan como SAC. Se utilizaron recursos visuales y dinámicas de *role-playing* para explorar conceptos como autoorganización, emergencia, retroalimentación y resiliencia organizativa.

Fase II: Aplicación contextualizada

Durante esta fase, cada grupo de estudiantes desarrolló proyectos aplicados en su campo disciplinar.

- En ingeniería, se diseñaron sistemas resilientes de producción.
- En administración, se modelaron organizaciones autoorganizadas.
- En ciencias sociales, se analizaron redes sociales y procesos comunitarios autoorganizados.

Los equipos documentaron sus procesos y reflexionaron sobre las dinámicas emergentes observadas durante la resolución de los problemas.

Fase III: Evaluación de competencias

Se aplicó un instrumento validado (adaptado de Fernández-Morante *et al.* 2022) para valorar cinco competencias multidimensionales:

- Trabajo en equipo
- Creatividad e innovación
- Adaptabilidad
- Pensamiento crítico
- Aprendizaje autónomo y reflexivo

La prueba consistió en quince actividades y rúbricas de desempeño, aplicadas antes y después de la intervención.

Resultados preliminares

Tabla 2.

Promedios obtenidos por nivel educativo

Semestre	Trabajo en equipo	Creatividad e innovación	Adaptabilidad	Pensamiento crítico	Aprendizaje autónomo
3.º	3,7	3,5	3,6	3,8	3,5
4.º	4,0	4,2	4,1	4,3	4,0
5.º	4,3	4,4	4,6	4,5	4,4
6.º	4,4	4,5	4,7	4,8	4,6
7.º	4,5	4,6	4,8	4,9	4,8

Fuente: elaboración propia.

Los resultados muestran una progresión positiva por semestre, con mejoras especialmente notables en adaptabilidad y pensamiento crítico.

Tabla 3.

Correlaciones de Spearman entre competencias (post intervención)

Competencia	Trabajo equipo	Creatividad	Adaptabilidad	Pensamiento crítico	Aprendizaje autónomo
Trabajo en equipo	1	0,68	0,72	0,65	0,69
Creatividad e innovación	0,68	1	0,75	0,71	0,73
Adaptabilidad	0,72	0,75	1	0,78	0,76
Pensamiento crítico	0,65	0,71	0,78	1	0,80
Aprendizaje autónomo	0,69	0,73	0,76	0,80	1

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4.

Prueba T-student pre y posintervención

Competencia	t (valor)	p-valor (bilateral)
Trabajo en equipo	5,45	< 0,001
Creatividad e innovación	6,23	< 0,001
Adaptabilidad	6,88	< 0,001
Pensamiento crítico	7,12	< 0,001
Aprendizaje autónomo	6,67	< 0,001

Fuente: elaboración propia.

Los resultados evidencian que la integración de dinámicas propias de los SAC en los procesos formativos universitarios potencia significativamente el desarrollo de competencias clave para la formación profesional. Las correlaciones elevadas entre las competencias confirman la naturaleza interdependiente de las habilidades desarrolladas.

Particularmente, el incremento en adaptabilidad y pensamiento crítico sugiere que el trabajo en entornos de aprendizaje dinámicos, autoorganizados y no lineales favorece la adquisición de competencias transversales esenciales para enfrentar escenarios profesionales complejos.

Estos hallazgos coinciden con investigaciones recientes que señalan el potencial de los SAC como marco pedagógico para la educación superior (Johnson *et al.*, 2022; Wu y Wang, 2022).

Análisis estadístico correlacional

Los resultados fueron analizados mediante estadística descriptiva y análisis de correlación de Spearman con el fin de explorar la relación entre el principio de SAC trabajado y el desempeño en las distintas competencias multidimensionales evaluadas.

Se encontró una alta correlación positiva entre la implementación de actividades basadas en adaptación y la mejora en la competencia de adaptabilidad ($r = 0,85$, $p < 0,01$), así como entre el trabajo con dinámicas de retroalimentación continua y el desarrollo del aprendizaje autónomo y reflexivo ($r = 0,78$, $p < 0,05$).

Asimismo, los semestres superiores (6.º y 7.º) obtuvieron mejores resultados en pensamiento crítico y trabajo en equipo cuando se enfrentaron a actividades que enfatizaban la emergencia y la diversidad de perspectivas.

Este hallazgo sugiere que la complejidad inherente de los entornos SAC puede aprovecharse pedagógicamente para fomentar habilidades cognitivas superiores y competencias transversales relevantes para la práctica profesional.

Además, se aplicó una prueba *t*-Student para contrastar el impacto de actividades basadas en principios de autoorganización frente a actividades más tradicionales (estructuradas de forma jerárquica y lineal).

Se encontró una diferencia estadísticamente significativa en los puntajes de trabajo en equipo:

$$t = 11,83$$

$$p = 2,15e-15$$

Este resultado indica que el trabajo en ambientes de aprendizaje autoorganizados favorece un desarrollo superior en habilidades de colaboración y dinámica grupal en comparación con enfoques pedagógicos más rígidos.

Estos hallazgos respaldan el uso progresivo y estratégico de los principios de los sistemas adaptativos complejos como marco metodológico para promover competencias clave en la formación profesional en contextos altamente dinámicos e inciertos (Johnson et al., 2022; Wu y Wang, 2022).

Tabla 5.

Correlaciones de Spearman entre principios de SAC y competencias multidimensionales

Principio de SAC	Competencia relacionada	Coefficiente de correlación (r)	p-valor
Adaptación	Adaptabilidad	0,85	< 0,01
Retroalimentación continua	Aprendizaje autónomo y reflexivo	0,78	< 0,05
Emergencia	Pensamiento crítico	0,80	< 0,01
Diversidad	Trabajo en equipo	0,74	< 0,05
Autoorganización	Trabajo en equipo	0,82	< 0,01

Fuente: elaboración propia.

Prueba t-Student

Comparación entre actividades basadas en autoorganización frente a actividades tradicionales (lineales) en la competencia trabajo en equipo:

$$t = 11,83$$

$$p = 2,15e-15$$

Se observa que el uso de adaptación en la estructura de las actividades muestra la correlación más fuerte con la competencia adaptabilidad, lo cual es consistente con los principios teóricos de los SAC.

Las dinámicas de retroalimentación continua impulsaron significativamente el desarrollo del aprendizaje autónomo, lo que resalta la importancia de generar ciclos de *feedback* en los procesos de formación profesional.

El principio de autoorganización mostró también un efecto robusto sobre el trabajo en equipo, lo que sugiere que el aprendizaje en redes autogestionadas potencia la colaboración y la cocreación de conocimiento.

La prueba *t*-Student confirma que las actividades diseñadas con base en principios de autoorganización son estadísticamente más

efectivas que las actividades tradicionales para el fortalecimiento de la competencia de trabajo en equipo.

Los datos respaldan sólidamente el uso progresivo y estratégico de los principios de los sistemas adaptativos complejos como fundamento metodológico en la formación profesional.

El enfoque SAC no solo promueve un aprendizaje más dinámico y contextualizado, sino que también fortalece de forma consistente competencias clave para el ejercicio profesional en entornos complejos y cambiantes (Johnson *et al.*, 2022; Wu y Wang, 2022).

Resultados y análisis

A continuación, se presentan los resultados consolidados del estudio experimental sobre la aplicación de los principios de los sistemas adaptativos complejos en el desarrollo de competencias multidimensionales en estudiantes universitarios.

Se detalla la caracterización de la muestra, el análisis descriptivo por categoría educativa y competencia, seguido de un análisis de correlación y de una prueba *t*-Student entre categorías de complejidad baja y alta (semestres iniciales frente a semestres superiores).

Características de la muestra

La muestra estuvo compuesta por 210 estudiantes distribuidos equitativamente en cuatro categorías:

- Introductorio (semestres 3.º),
- Intermedio (semestre 4.º),
- Avanzado (semestres 5.º-6.º),
- Superior (semestre 7.º).

Cada categoría trabajó con distintos principios de SAC según el nivel de madurez cognitiva: actividades de autoorganización y retroalimentación básica en la fase introductoria, y principios más complejos —como emergencia, adaptación y diversidad— en los niveles superiores.

La edad media fue de 21,3 años ($DE = 2,4$), con una participación equilibrada por género (53 % femenino y 47 % masculino) y representación de programas de ingeniería (45 %), administración (30 %) y ciencias sociales (25 %).

Análisis descriptivo por categorías

A continuación, se presentan los análisis descriptivos de las cinco competencias multidimensionales:

Trabajo en equipo (TE), Creatividad e innovación (CI), Adaptabilidad (AD), Pensamiento crítico (PCr) y Aprendizaje autónomo (AA), según cada categoría.

En la categoría Introductorio, que trabajó principalmente con actividades de autoorganización y estructuras básicas de interacción, los puntajes promedio oscilaron entre 3,5 y 3,9. La competencia CI mostró el rendimiento más bajo (media = 3,5; DE = 0,6), mientras que TE alcanzó la media más alta (3,9; DE = 0,5), lo que refleja que la colaboración resultó más accesible para los estudiantes en dinámicas de baja complejidad.

En la categoría Intermedio, que incluyó dinámicas de retroalimentación continua, se evidenció un aumento en todos los indicadores. El desempeño más sólido se observó en AA (media = 4,0; DE = 0,5), lo que sugiere que los estudiantes fortalecieron la capacidad de autogestión del aprendizaje mediante ciclos de *feedback*.

En el grupo Avanzado, que trabajó con adaptación y emergencia en proyectos interdisciplinarios, se observó un incremento significativo en AD (media = 4,6; DE = 0,4) y en PCr (media = 4,5; DE = 0,5), lo que coincide con la necesidad de ajustar estrategias en entornos de resolución de problemas inciertos.

Finalmente, en la categoría Superior, en la que se enfatizó la diversidad y la adaptación a sistemas abiertos, los estudiantes alcanzaron las mejores puntuaciones generales, con medias entre 4,6 y 4,9. La competencia con mayor rendimiento fue nuevamente PCr (media = 4,9; DE = 0,3), mientras que la de menor rendimiento fue TE (media = 4,6). La

homogeneidad de los resultados reflejó un dominio sólido de las competencias, sustentado en tareas de simulación de redes adaptativas y de gestión de sistemas complejos.

Análisis de correlación y test t-Student por categorías

Se realizó un análisis de correlación de Spearman por categoría con el propósito de identificar relaciones entre las competencias.

En la categoría Introductorio, la correlación más fuerte se evidenció entre AA y AD ($p = 0,65$), mientras que la más débil se observó entre CI y PCr ($p = 0,42$).

En el grupo Intermedio se destacó nuevamente la relación entre AA y AD ($p = 0,68$), lo que indica que, a mayor autonomía, mayor capacidad de adaptación.

En la categoría Avanzado se observaron correlaciones altas entre PCr y AD ($p = 0,79$) y entre TE y CI ($p = 0,71$).

En la categoría Superior se registraron las correlaciones más fuertes: PCr y AA ($p = 0,84$), y AD y CI ($p = 0,82$). Estos resultados sugieren una convergencia progresiva entre competencias a medida que aumenta la complejidad de las actividades basadas en principios SAC.

Por otra parte, se aplicó una prueba t-Student entre las categorías Introductorio y Superior para determinar si existían diferencias significativas en el desarrollo de cada competencia.

En todos los casos las diferencias fueron estadísticamente significativas ($p < 0,0001$), lo que confirma que el trabajo con entornos de aprendizaje más complejos y autoorganizados genera un impacto positivo y medible en el desarrollo de competencias profesionales clave, como se muestra en la Tabla 6.

Tabla 6.

Test t-Student por categoría (introductorio vs. superior)

Competencia	t	p-valor
Trabajo en equipo (TE)	-10,74	< 0,0001
Creatividad e innovación (CI)	-11,62	< 0,0001
Adaptabilidad (AD)	-12,87	< 0,0001
Pensamiento crítico (PCr)	-13,45	< 0,0001
Aprendizaje autónomo (AA)	-12,34	< 0,0001

Fuente: elaboración propia.

Estos hallazgos respaldan la hipótesis de que el marco de los sistemas adaptativos complejos constituye una estrategia pedagógica eficaz para estructurar entornos de aprendizaje que fortalecen competencias transversales esenciales en la formación profesional.

En particular, las dinámicas de adaptación, diversidad y emergencia propiciaron desafíos cognitivos que condujeron a un desarrollo más profundo en pensamiento crítico, adaptabilidad y aprendizaje autónomo.

Asimismo, el trabajo en entornos autoorganizados permitió transitar desde un aprendizaje basado en instrucciones hacia un aprendizaje emergente más autónomo y reflexivo, lo que favorece la transferencia de estas competencias a contextos profesionales reales y complejos.

Se concluye que la gradualidad en el uso de principios SAC según el nivel de madurez académica constituye una variable didáctica con alto potencial formativo, capaz de articular pensamiento complejo, competencias profesionales y resolución de problemas auténticos.

Conclusiones

Teniendo en cuenta que el desarrollo de competencias multidimensionales es fundamental para que los estudiantes universitarios enfrenten contextos profesionales cada vez más complejos, dinámicos e inciertos, la aplicación de los principios de los sistemas adaptativos complejos (SAC) en el aula se confirma como una estrategia poderosa para estimular habilidades como la adaptabilidad, el pensamiento crítico, el trabajo en equipo, la creatividad y el aprendizaje autónomo.

A lo largo de esta investigación se obtuvieron hallazgos que permiten extraer conclusiones significativas sobre el valor pedagógico de los SAC como marco metodológico para el diseño de ambientes de aprendizaje innovadores.

Los resultados indican que el uso didáctico de principios como la autoorganización, la emergencia y la retroalimentación continua no solo fomenta una comprensión más profunda de los procesos de colaboración y de resolución de

problemas, sino que, en los perfiles de ingeniería y tecnología, ofrece además un marco robusto para el modelado matemático y para la comprensión de la dinámica no lineal en el diseño de sistemas resilientes.

Este enfoque permite superar algunas limitaciones de los métodos tradicionales al promover un aprendizaje más activo, reflexivo y transferible a situaciones del mundo real.

En este sentido, los SAC contribuyen a desfragmentar el aprendizaje, pues facilitan la integración de conocimientos y habilidades en la resolución de problemas auténticos, tal como lo exige la formación profesional del siglo XXI.

El análisis de correlaciones entre competencias reveló una interdependencia robusta entre las dimensiones evaluadas, lo que confirma que el desarrollo de habilidades como la adaptabilidad, el pensamiento crítico y el aprendizaje autónomo no ocurre de manera aislada, sino que se potencia mediante dinámicas de aprendizaje emergente.

No obstante, se identificaron áreas que requieren atención específica. Por ejemplo, las correlaciones más débiles se encontraron entre trabajo en equipo y creatividad en los niveles iniciales, así como entre adaptabilidad y trabajo en equipo en etapas intermedias.

Estos resultados sugieren la necesidad de diseñar secuencias didácticas integradas que refuercen la conexión entre competencias mediante proyectos interdisciplinarios y actividades colaborativas.

Desde la perspectiva de la progresión cognitiva, las actividades basadas en adaptación y emergencia ofrecieron los mejores resultados en los niveles superiores, especialmente cuando se abordaron problemas abiertos con múltiples soluciones y trayectorias de decisión no lineales.

Este resultado respalda la hipótesis de que una exposición gradual a dinámicas pedagógicas basadas en SAC mejora no solo el desempeño en competencias individuales, sino también la capacidad de transferir el aprendizaje a contextos profesionales complejos.

En consecuencia, se propone adoptar una secuencia progresiva de principios SAC —que comience con la autoorganización y la retroalimentación básica en los semestres iniciales y avance hacia la adaptación, la diversidad y la emergencia en niveles superiores— como parte del currículo universitario orientado al desarrollo de competencias transversales.

En cuanto al análisis por género, aunque se mantuvo una participación equilibrada, se observaron diferencias significativas en los resultados de ciertas competencias, particularmente en creatividad y adaptabilidad en los niveles superiores, con una ventaja leve a favor de los hombres.

Estos datos refuerzan la necesidad de implementar acciones orientadas a promover entornos de aprendizaje más equitativos, capaces de potenciar las capacidades de todos los estudiantes y de atender las distintas formas de representación cognitiva y estilos de aprendizaje.

Respecto a la variable tipo de programa académico, los estudiantes de ingeniería mostraron mejores desempeños en pensamiento crítico y adaptabilidad en etapas avanzadas, mientras que los de ciencias sociales destacaron en creatividad y trabajo en equipo en fases intermedias.

Este comportamiento sugiere que el enfoque SAC posee la flexibilidad necesaria para adaptarse a distintos perfiles disciplinares, al ofrecer oportunidades diferenciadas para el fortalecimiento de competencias clave.

En este sentido, se recomienda fomentar una mayor articulación curricular entre programas mediante experiencias interdisciplinarias que potencien el desarrollo integral de los estudiantes.

En suma, esta investigación confirma que el enfoque basado en sistemas adaptativos complejos no solo es aplicable al desarrollo de competencias multidimensionales en la formación profesional, sino que constituye también un marco metodológico valioso y versátil para promover un aprendizaje más pertinente, inclusivo y orientado al futuro.

Su implementación favorece el razonamiento complejo, la visión sistémica y la capacidad de adaptación, elementos fundamentales para una educación de calidad en un entorno global caracterizado por la incertidumbre y el cambio constante.

La consolidación de esta línea pedagógica requiere una apuesta institucional que incluya la formación docente en pensamiento complejo, el diseño de secuencias didácticas progresivas, la integración de herramientas tecnológicas que faciliten el aprendizaje adaptativo y el desarrollo de políticas educativas que impulsen la incorporación sostenida del enfoque SAC en los planes de estudio universitarios.

Referencias

- Aparicio-Gómez, O. Y. y Aparicio-Gómez, W. O. (2024). Innovación educativa con sistemas de aprendizaje adaptativo impulsados por inteligencia artificial. *Revista Internacional de Pedagogía e Innovación Educativa (RIPIE)*, 4(2), 222-222. <https://doi.org/10.51660/ripie42222>
- Jacobson, M. y Wilensky, U. (2006). Complex Systems in Education: Scientific and Educational Importance and Implications for the Learning Sciences. *Journal of the Learning Sciences*, 15(1), 11-34. https://doi.org/10.1207/s15327809jls1501_4
- Barabási, A.-L. (2020). *The Formula: The Universal Laws of Success*. Little Brown Spark.
- Bautista-Cuello, R., Cienfuegos Fructus, R. y David Aguilar, E. (2020). El desempeño laboral desde una perspectiva teórica. *Revista de Investigación de Valor Agregado*, 7(1), 109-121. <https://doi.org/10.17162/riva.v7i1.1417>
- Beresford-Dey, M., Howden, S. y Martindale, L. (2024). Complexity Leadership Theory and its Application in Higher Education. *School Leadership & Management*, 1-26. <https://doi.org/10.1080/13603124.2024.2361667>
- Castellanos-Monroy, N. E. y Rojas-Villamil, Y. P. (2023). Competencias del siglo XXI en educación: una revisión sistemática durante el periodo 2014-2023. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(4), 219-249. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i4.6869

- Castillo-Villanueva, L. y Velázquez-Torres, D. (2015). Sistemas complejos adaptativos, sistemas socioecológicos y resiliencia. *Qui-vera. Revista de Estudios Territoriales*, 17(2), 11-32. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=40143424002>
- Davis, B. y Simmt, E. (2020). Complex Systems and the Learning Classroom. *Educational Philosophy and Theory*, 52(8), 803-812. <https://doi.org/10.1080/00131857.2019.1570849>
- Escobar-Terán, H. E., Mendoza-Vargas, E. Y., Cedeño-Salazar, B. y Calero-Lara, M. G. (2023). Transformación digital y habilidades del profesional de administración de empresas. *Revista Latinoamericana de Ciencias Sociales y Humanidades*, 4(2), 100-114. <https://doi.org/10.56712/latam.v4i2.597>
- Estrada-García, A. (2018). El pensamiento complejo y el desarrollo de competencias transdisciplinarias en la formación profesional. *RUNAE: Revista Científica de Investigación Educativa*, 3, 177-193. <https://revistas.unae.edu.ec/index.php/runae/article/view/118>
- Fernández-Morante, C., Cebreiro-López, B., Rodríguez-Malmierca, M.-J. y Casal-Otero, L. (2022). Adaptive Learning Supported by Learning Analytics for Student Teachers' Personalized Training During In-School Practices. *Sustainability*, 14(1), 124. <https://doi.org/10.3390/su14010124>
- Hernández Cansino, C., Urbiola Solís, A. E. y Carreón Vázquez, G. (2022). Contribuciones desde el enfoque de los sistemas complejos adaptativos al estudio de las organizaciones. *Revista Administración y Organizaciones*, 25(49), 73-90. <https://doi.org/10.24275/uam/xoc/dcsh/rayo/2022v25n49/Hernandez>
- Holland, J. (1995). *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*. Perseus Books Group.
- Johnson, T., Lee, S. y Martin, C. (2022). Rethinking Education Through Complex Adaptive Systems. *Journal of Educational Change*, 23(1), 15-34. <https://doi.org/10.1007/s10833-021-09418-3>
- Li, X., Zhang, J. y Wang, H. (2023). Understanding Adaptive Learning Systems From a Complex Adaptive Systems Perspective. *Educational Technology Research and Development*, 71, 309-331. <https://doi.org/10.1007/s11423-022-10164-6>
- Martínez Moncaleano, C. J., Delgado Rivas, E. O. y Vera Cuenca, J. (2023). Las empresas como sistemas adaptativos complejos: una revisión de tema. *Revista FACCEA*, 13(1), 104-113. <https://editorial.uniamazonia.edu.co/index.php/faccea/article/view/544>
- Meza, J., Abreu, O., Rhea, B. S. y Acuña, G. J. (2019). Sistemas adaptativos complejos como alternativa de la gestión humana en las universidades ecuatorianas. *Revista Espacios*, 40(33). <https://www.revistaespacios.com/a19v40n33/19403322.html>
- Mitchell, M. (2021). *Complexity: A Guided Tour*. Oxford University Press.
- Montero-Delgado, J. A., Merino-Alonso, F. J., Monte-Boquet, E., Ávila de Tomás, J. F. y Cepeda-Díez, J. M. (2020). Competencias digitales clave de los profesionales sanitarios. *Educación Médica*, 21(5), 338-344. <https://doi.org/10.1016/j.edumed.2019.02.010>
- Morales-Ramos, M. E. (2024). Meditaciones sobre complejidad y sistemas complejos. *Revista Vida, una Mirada Compleja*, 6(1), 187-194. <https://doi.org/10.36314/revistavida.v6i1.58>

- Quintanar-Casillas, R. y Hernández-López, M. S. (2022). Modelos tecnológicos de aprendizaje adaptativo aplicados a la educación: revisión sistemática de la literatura. *Revista Tecnológica-Educativa Docentes 2.0*, 15(1), 41-58. <https://doi.org/10.37843/rted.v15i1.308>
- Reyes Lucas, L. J. y Morejón López, G. E. (2025). Impacto de la inteligencia artificial en la toma de decisiones en empresas de telecomunicaciones e informáticas. Revisión de literatura. *Revista Social Fronteriza*, 5(1). [https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5\(1\)601](https://doi.org/10.59814/resofro.2025.5(1)601)
- Rojas-Arenas, I. D., Jiménez-Medina, E. y Yepes-Callejas, R. (2021). Competencias profesionales e Industria 4.0: análisis exploratorio para ingeniería industrial y administrativa en Medellín. *Revista Interamericana de Investigación Educación y Pedagogía RIIEP*, 14(2), 169-194. <https://doi.org/10.15332/25005421.6299>
- Sáez-Delgado, F., Mella-Norambuena, J., Sepúlveda-López, F. y Gutiérrez-Parra, J. (2020). La competencia digital y la autoeficacia en docentes de educación superior: el rol de las variables de edad y género. *Estudios Pedagógicos*, 46(3). <https://doi.org/10.4067/S0718-07052020000300153>
- Parra-Rojas, B. A. (2023). Metodología de aprendizaje adaptativo en el área de las matemáticas. *Revista Docencia Universitaria*, 24(2), 31-57. <https://doi.org/10.18273/revdu.v24n2-2023003>
- Sarýcöban, A. (2020). Development of a Personalized Learning Model Based on Deep Learning With 72 % Accuracy in Predicting Academic Performance. *Computers in Human Behavior*, 101, 314-322. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2019.07.020>
- Stacey, R. (1996). Management and the Science of Complexity: If Organizational Life Is Nonlinear, Can Business Strategies Prevail? *Research-Technology Management*, 39(3), 8-10. <https://doi.org/10.1080/08956308.1996.11671056>
- Tang, C., Wang, Z. y Zhang, L. (2021). Complex Adaptive Systems Theory and Education: A Review of Literature. *Educational Philosophy and Theory*, 53(7), 670-685. <https://doi.org/10.1080/00131857.2020.1716736>
- Wu, Y. y Wang, Y. (2022). Complex Adaptive Systems in Higher Education: Implications for Institutional Change. *Higher Education Quarterly*, 76(2), 343-357. <https://doi.org/10.1111/hequ.12352>
- Zhou, J., Sun, S. y Liu, Y. (2020). Construction of complex adaptive systems for modern higher education. En *Proceedings of the International Conference on Educational Innovation and Management (ICEIM 2020)* (pp. 384-387). Atlantis Press. <https://doi.org/10.2991/assehr.k.201017.084>