

# ENTROPÍA CURRICULAR Y REDES COMPLEJAS PARA EL DESARROLLO DE PROYECTOS AMBIENTALES ESCOLARES (PRAE)

FECHA DE RECEPCIÓN: 20-12-25 / FECHA DE ACEPTACIÓN: 27-04-25

**Mauro Montealegre Cárdenas**

PH.D. MATEMÁTICAS Y PROFESOR TITULAR USCO

Correo electrónico: [mmonteval@usco.edu.co](mailto:mmonteval@usco.edu.co)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1577-5971>

**Jasmidt Vera Cuenca**

DOCTORADO COMPLEJIDAD Y PROFESORA TITULAR USCO

Correo electrónico: [jasmidt.vera@usco.edu.co](mailto:jasmidt.vera@usco.edu.co)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8965-0661>

**Edinson Oswaldo Delgado Rivas**

MAGISTER COMPLEJIDAD E DOCENTE INVESTIGADOR UNINAVARRA

Correo electrónico: [oswaldodelgador@gmail.com](mailto:oswaldodelgador@gmail.com)

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4736-0436>

## RESUMEN

En este artículo se presenta un indicador de entropía curricular y el enfoque de redes complejas de la crisis climática para fortalecer el desarrollo y la contextualización de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE). Esta investigación considera dimensiones socioambientales de la crisis climática, destacando la necesidad de su comprensión holística. En este sentido, teniendo en cuenta los factores ambientales relacionados con este fenómeno como los gases de efecto invernadero (GEI), las quemas y las deforestaciones, se propone la implementación de la noción de entropía curricular como estrategia didáctica que interconecta de manera no lineal del currículo, la participación activa de los estudiantes y fortaleciendo la educación ambiental. Por otro lado, se presenta

una metodología de evaluación de entropía de un diseño curricular de una intervención pedagógica, proporcionando una métrica de la diversidad y complejidad de la adaptación curricular. En conclusión, la implementación de indicadores de entropía curricular y la implementación de redes complejas del cambio climático en los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) promueve la comprensión de la flexibilidad, no linealidad en el currículo, y procesos de interdisciplinariedad asociados a redes de mundo pequeño.

**Palabras clave:** Entropía curricular, Redes de mundo pequeño, Cambio climático, Currículo No Lineal, Interdisciplinariedad y Proyectos Ambientales Escolares, (PRAE).

## **ABSTRACT**

This article introduces a curricular entropy indicator and applies a complex-network perspective on the climate crisis to strengthen the development and contextualization of School Environmental Projects (PRAE). The study considers the socio-environmental dimensions of the climate crisis, emphasizing the need for a holistic understanding. Taking into account environmental factors linked to this phenomenon—such as greenhouse gases (GHG), burning practices, and deforestation—it proposes the use of the notion of curricular entropy as a didactic strategy that non-linearly interconnects the curriculum, fosters students' active participation, and reinforces environmental education. In addition, it presents a methodology for evaluating the entropy of a curricular design within a pedagogical intervention, providing a metric for the diversity and complexity of curricular adaptation. In conclusion, implementing curricular-entropy indicators and complex climate-change networks in PRAE promotes an appreciation of curricular flexibility, non-linearity, and the interdisciplinary processes associated with small-world networks.

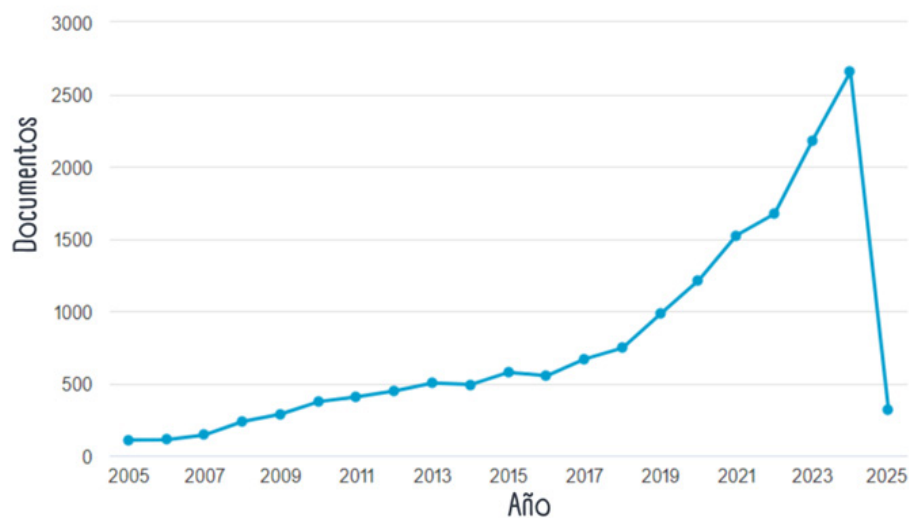
**Keywords:** Curricular entropy, small-world networks, climate change, nonlinear curriculum, interdisciplinarity, School Environmental Projects (PRAE).

## **1. INTRODUCCIÓN**

La comprensión del cambio climático ha evolucionado en las últimas décadas, pasando de ser un tema exclusivamente científico a convertirse en un desafío multidimensional que integra desde aspectos ambientales, sociales, económicos, hasta educativos. En esta dirección, la modelación del cambio climático se transforma en una herramienta fundamental para comprender la complejidad de los sistemas climáticos y sus interacciones con el entorno y desarrollar estrategias para la mitigación y adaptación de la crisis climática, (Roca Jusmet, 2018). El Programa de Educación Ambiental (PRAE) emerge en las instituciones educativas como un pilar fundamental para promover la interconexión curricular en torno a la educación ambiental, (Fien, 1992), (Novo, 2006) (Leff, 2022). No obstante, al integrar la modelización climática como un recurso didáctico,

el PRAE fortalece los ecosistemas de aprendizaje que movilizan de forma dinámica los currículos de las instituciones educativas, (Manabe & Wetherald, 1967), (Hasselmann, 1976). Entender las causas subyacentes y las interconexiones en el sistema climático local se vuelve esencial para implementar medidas eficaces de mitigación y adaptación curricular de forma contextualizada, (Minambiente, 2019).

Por otro lado, desde una perspectiva más técnica, al introducir los términos de búsqueda “redes del cambio climático y proyectos escolares ambientales” en la base de datos “SCOPUS”, en la figura 1 se observa un incremento constante en la publicación de artículos especializados en los últimos 20 años, alcanzando un total de 16.191 resultados. Este aumento evidencia la creciente importancia y el desarrollo continuo de la integración de redes sobre el cambio climático en la educación escolar, estableciéndose como un campo de investigación en constante evolución y creciente interés. Este fenómeno consolida su posición como un área de investigación crucial en la actualidad, subrayando la necesidad de comprender y abordar los desafíos del cambio climático desde una perspectiva educativa e investigativa.



**FIG 1. PUBLICACIONES SOBRE REDES DEL CAMBIO CLIMÁTICO Y PROYECTOS EDUCATIVOS. FUENTE: BASE DE DATOS SCOPUS.**

En primera instancia, se propone concebir el currículo como un sistema autopoiético, donde el ser y el hacer están intrínsecamente vinculados, dando lugar a una estructura curricular que se construye y se autorregula internamente, (Maturana & Varela, 2003) (Simon, 2019). Así, la interdisciplinariedad se convierte en un principio fundamental, donde las diversas áreas de conocimiento se entrelazan de manera indistinguible, formando una red compleja que refleja la naturaleza dinámica y autónoma del proceso educativo, (Maldonado C., 2015) (Castro Sáez, 2001). Esta estructura curricular autopoiética no solo promueve la integración de diferentes disciplinas, sino que también fomenta la adaptabilidad y la flexibilidad, permitiendo que el currículo evolucione continuamente en respuesta a los

cambios en el entorno educativo y las necesidades de los estudiantes, (Maturana, 1980), (Maldonado, C, 2017).

### **Modelización del cambio climático y la Transposición didáctica**

La integración de la modelización de la crisis climática dentro del ámbito educativo del PRAE representa desde el punto de vista metodológico uno de los mayores retos en el proceso de implementación del currículum. Como parte integral del compromiso educativo las redes ambientales asumen un rol protagónico al ofrecer un enfoque multidisciplinario que integra la ciencia ambiental, las ciencias sociales y las matemáticas de manera contextualizada, (Bateson, 1979), (Leff, 2000).

La transposición didáctica, conceptualizada por Yves Chevallard (Chevallard, 2013), es fundamental para comprender cómo se lleva el conocimiento científico al contexto educativo, implicando una cuidadosa adaptación de los conocimientos científicos al entorno escolar. Este tipo de transposición implica transformar el conocimiento científico sobre la crisis climática en saberes accesibles y pertinentes para los estudiantes, considerando su nivel de comprensión y contexto educativo promoviendo el aprendizaje significativo y la comprensión profunda de las complejidades del cambio climático. Por ello se hace imperativo pasar de un enfoque tradicional de enseñanza a uno interdisciplinar y dinámico, permitiendo abordar el cambio climático desde múltiples perspectivas, a través de una comprensión integral del problema, (Maldonado, 2016).

### **Redes de Mundo Pequeño y la no linealidad del currículo**

Por su parte, las redes de mundo pequeño, un concepto originario de la teoría de redes, describen sistemas donde los nodos están altamente interconectados. Esta noción adquiere relevancia al considerar la necesidad de conexiones dinámicas y efectivas entre los diferentes actores y recursos involucrados en la gestión ambiental escolar para gestión del cambio climático, (Watts & Strogatz, 1998), (Barabasi, 2003).

Los modelos de redes complejas evidencian interconexión y colaboración entre los diversos agentes involucrados en la gestión ambiental escolar, lo que promueve una colaboración activa entre estudiantes, profesores, instituciones educativas, comunidades locales y organizaciones ambientales. Además, esta colaboración facilita el intercambio de conocimientos, recursos y experiencias, fortaleciendo así los PRAE y su capacidad para abordar el cambio climático de manera integral. Asimismo, los grados de resiliencia y ciclos de adaptabilidad inherentes a las redes de mundo pequeño permiten a los PRAE adaptarse a los desafíos ambientales emergentes y a las necesidades evolutivas de los estudiantes y la comunidad escolar. Esto implica la flexibilidad para ajustar estrategias, implementar nuevas iniciativas y responder de manera sistémica a los impactos del cambio climático en el entorno escolar, (Holling, 1973), (Walker et al., 2003).

Otro aspecto crucial es la eficiencia en la comunicación que ofrecen la existencia de las redes complejas, promoviendo la difusión de información relevante sobre el cambio climático y la generación de buenas prácticas ambientales. En el contexto de los PRAE es esencial para involucrar a todos los actores pertinentes, promover la conciencia ambiental y coordinar esfuerzos para mitigar y adaptarse a los efectos del cambio climático, (Newman, 2003).

De esta forma, la estructura de redes de mundo pequeño permite que las acciones locales tengan un impacto amplificado a través de conexiones globales y sinérgicas, (Watts & Strogatz, 1998), (Barabási, 2002). Esto significa que las iniciativas ambientales desarrolladas a nivel escolar pueden influir en comunidades más amplias, contribuyendo significativamente a la lucha contra el cambio climático a escalas regional, nacional e internacional, (Perkins, 2023).

La modelización de la crisis climática mediante redes complejas no solo pretende comprender la dinámica climática, sino también promover la conciencia y su comprensión en la comunidad educativa y la sociedad en general (Gore, 2007), (IPCC, 2021). Así pues, el objetivo de investigación se estructura en torno a la exploración de la entropía curricular y las redes complejas del cambio climático como herramienta interdisciplinar para fortalecer la implementación de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), como también fomentar la alfabetización climática en diversos niveles.

### **Entropía Curricular en el contexto de los Proyectos Ambientales Escolares**

En el contexto de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) el concepto de entropía educativa ofrece una perspectiva para abordar los desafíos actuales en la educación ambiental. Esta entropía, por su origen termodinámico del no equilibrio, se refiere al grado de desorden, excitación o incertidumbre del sistema, (I. Prigogine, 1997), (Boltzmann, 2012). Al realizar una migración conceptual al ámbito educativo, se puede analizar cómo los sistemas educativos manejan la complejidad y la incertidumbre inherente a la enseñanza y el aprendizaje, (I. (Ilya) Prigogine, 1980). Particularmente en los PRAE, la entropía educativa se manifiesta en la forma en que se gestionan las problemáticas ambientales, reconociendo que el entorno natural y social es dinámico y cambiante. La entropía curricular sugiere que, en lugar de buscar una rigidez estructural, se debe promover una organización pedagógica que posibilite: la adaptación, flexibilidad, la creatividad, la innovación y la capacidad de respuesta a nuevas situaciones y conocimientos emergentes, (I. Prigogine & Rysselberghe, 1963), (Leff, 2000).

En este contexto, la entropía curricular tiene las siguientes propiedades:

- **Diversidad de saberes:** La variedad y amplitud de temas, enfoques pedagógicos, métodos de enseñanza y recursos utilizados en un plan de estudios. Cuanta más diversidad de saberes interconectados haya, mayor será la entropía curricular. Entropía asociada a la red curricular de mundo pequeño, entre más sea de mundo

pequeño mayor es el grado de entropía, (Leinster, T, 2020).

- **Interdefinibilidad:** La medida en que los diferentes elementos del plan de estudios están interrelacionados y conectados entre sí. No se define solo, se necesitan varios factores para definirse (malla curricular, proyectos, metodologías, procesos de evaluación, niveles de aprendizaje, niveles de motivación, cuanto más diversas e inciertas, interdefinibles sean estas interconexiones, mayor será la entropía curricular, (Candia et al., 2022)
- **Flexibilidad y Adaptabilidad:** La capacidad del currículo para adaptarse a cambios, integrar nuevas ideas, enfoques o avances educativos. Una mayor flexibilidad puede aumentar la entropía curricular al permitir múltiples enfoques y adaptaciones, (Holland, J., 1992), (Brusilovsky & Peylo, 2003), (Holland, 2005).

Es preciso resaltar una distinción importante, la complejidad y la simplicidad coexisten en los sistemas naturales (Gell-Mann, 1994), (Fritzsche, 2018), una tesis que puede aplicarse a la entropía educativa para argumentar que los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) deben integrar la complejidad de la crisis climática mediante enfoques holísticos e interdisciplinarios. Naturalmente, la entropía curricular emerge como una métrica útil para evaluar y dinamizar la estructura curricular de un plan de estudios, destacando la necesidad de integrar saberes de diversos campos del conocimiento, (Perkins, 2023).

## 2. METODOLOGÍA

Esta investigación se fundamenta en la comprensión holística del fenómeno socioambiental de la crisis climática que se articula con los procesos curriculares. La relación descrita de entropía curricular permite abordar mediante redes complejas de mundo pequeño la complejidad de la crisis climática y fortalecer los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE).

El tipo de investigación, según su diseño, es exploratorio y descriptivo, ya que se busca, en primer lugar, identificar y analizar los factores determinantes de la crisis climática dentro del contexto educativo y cómo se interrelacionan en un modelo curricular. En este sentido, en cuanto a su alcance, la investigación es de tipo aplicada, ya que tiene como objetivo desarrollar un modelo curricular basado en redes complejas que pueda ser implementado en contextos escolares, con miras a fortalecer los PRAE y contribuir a la formación de estudiantes conscientes y capaces de afrontar los retos ambientales.

En este contexto, se desarrolló la siguiente ruta metodológica:

- **Identificación de Factores Determinantes en la crisis climática y Estructuración de un Modelo Curricular:** utilizar herramientas de análisis de redes complejas para identificar y visualizar el grafo de los factores claves de la crisis climática, como los gases de efecto invernadero, la deforestación y acciones curriculares ambientalmente

estratégicas. Visualizando un proceso autoorganizado para la sostenibilidad de vida, figura 2, a través de un modelo no lineal de las interacciones regenerativas entre estos factores: recursos hídricos, reforestaciones y generación de entornos resilientes.

- **Diseño de una Propuesta Interdisciplinar de Intervención Curricular:** para el aprendizaje interdisciplinario se construye una guía básica no lineal del modelo curricular que se integra abajo hacia arriba, como una red que articula funcionalmente a los agentes bióticos, comunidades de todo tipo en las singularidades locales de la biosfera, y abióticos incluyendo la noosfera, constituida por las percepciones conscientes que tienen, individual y colectivamente, las comunidades humanas que conviven en el ambiente escolar, (Teilhard de Chardin, 1969), (Edgar Morin, 2006). Expresando así su cosmovisión antrópica como red del mundo pequeño, que a escala fractal reconoce complejidades del mundo llevado a las restricciones del aula, sin perder su visión de complejidad creciente. La comprensión evolutiva y aleatoria, esto es entrópica, de los microestados que manifiestan los agentes del sistema curricular expresan la sostenibilidad ambiental deseada en las instituciones educativas. Así, en sus contextos el sistema curricular es autoorganizativo frente a las perturbaciones súbitas y emergentes de la crisis climática.
- **Orientaciones curriculares:** En la implementación de estrategias para abordar la crisis climática son útiles las simulaciones computacionales especializadas con Gephi, plataforma construye las redes complejas; permitió visualizar y filtrar las interacciones procesos claves como las emisiones de gases de efecto invernadero, cambios en el uso del suelo y la biodiversidad afectada por el clima, (Bastian, M., 2009) (Wilensky, U; Randall, 2015) .
- **Herramientas y métodos de Investigación:** En esta investigación, se emplearon una variedad de instrumentos, métodos y herramientas que facilitaron la integración de los factores determinantes de la crisis climática en un enfoque educativo interdisciplinario. A continuación, se describen los métodos y herramientas implementadas:
  - A. **Modelación Basada en Agentes con NetLogo:** NetLogo fue implementado para diseñar experiencias de laboratorio STEAM mediante el método de modelación basada en agentes. En este proceso, se integró la noción de transposición didáctica, que se refiere a la adaptación y transformación de conceptos científicos complejos en contenidos accesibles y relevantes para el contexto educativo. La modelación basada en agentes permitió simular dinámicas como el impacto del cambio climático en los ecosistemas y en el desarrollo urbano. Las simulaciones diseñadas en NetLogo sirvieron como una herramienta pedagógica que facilitó la comprensión de estas dinámicas por parte de los estudiantes, permitiéndoles interactuar con escenarios complejos y explorar cómo las decisiones humanas y naturales influyen en los sistemas climáticos y sociales, (Wilensky, U; Randall, 2015).

- B. Encuestas a Expertos en crisis climática: Se realizó una encuesta cualitativa dirigida a veinte expertos en crisis climática y educación ambiental para identificar los factores determinantes más relevantes en el contexto de la región sur colombiana. Las respuestas de los expertos proporcionaron datos esenciales para validar los análisis realizados y para diseñar una propuesta curricular que abordara las prioridades emergentes en torno a la gestión del cambio climático.
- C. Métrica de Análisis de la Entropía Curricular: para aplicar un análisis de entropía en el diseño de la estrategia curricular propuesta para los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), se puede utilizar el modelo de entropía de Shannon (Shannon, C. E., 1948). Este modelo matemático mide la incertidumbre o la diversidad en la estructura curricular:

El modelo general de la entropía de Shannon es:

$$E(C) = - \sum_{i=1}^n p(x_i) \log_2 p(x_i) \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

- $E(C)$ , es la entropía total del currículo con “n” áreas, categorías, o nodos.
- $p(x_i)$ , es la probabilidad de la ocurrencia o cumplimiento del componente del currículo  $x_i$ .
- $\log_2 p(x_i)$ , es el logaritmo en base 2 de la probabilidad de la ocurrencia o cumplimiento del componente del currículo  $x_i$ .

Asimismo, el valor máximo de la entropía para una estructura curricular de “n” áreas, categorías, o nodos y se puede representar mediante la expresión:

$$E(C)_{max} = \log_2 n \quad (\text{Ec. 2})$$

Entre tanto, el valor porcentual de la entropía para una estructura curricular de “n” áreas, categorías, o nodos y se puede representar mediante la expresión:

$$\%E(C) = \frac{E(C)}{E(C)_{max}} \cdot 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

Donde:

- $E(C)$ , es la entropía total del currículo con “n” áreas, categorías, o nodos.
- $E(C)_{max}$ , el valor máximo de la entropía para una estructura curricular de “n” áreas, categorías, o nodos.



En este sentido, para determinar el nivel de entropía en una estructura curricular, en términos de porcentaje se pueden considerar:

- **Muy Bajo (0-0.20]:** El currículo es altamente cohesivo y tiene poca diversidad en sus enfoques. La estructura es rígida y difícilmente se adapta a nuevos contenidos o enfoques interdisciplinarios.
- **Bajo (0.20-0.40]:** Hay un cierto grado de flexibilidad, pero sigue predominando una estructura curricular centralizada y poco diversa.
- **Medio (0.4-0.6]:** El currículo presenta un equilibrio entre cohesión y diversidad, permitiendo incorporar diferentes enfoques y adaptarse a algunos desafíos emergentes.
- **Alto (0.6-0.8]:** La entropía indica una alta diversidad en los enfoques y contenidos. El currículo es flexible y se adapta con facilidad a nuevos temas y desafíos interdisciplinarios.
- **Muy Alto (0.8-1]:** El currículo es altamente adaptable y flexible, permitiendo una amplia integración de contenidos diversos. Sin embargo, puede llegar a perder cohesión si no se gestiona correctamente la autoorganización, dado el elevado nivel de complejidad.

Esta métrica define una metodología para evaluar la entropía curricular en el contexto de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), permitiendo una comprensión integral de cómo el currículo gestiona la crisis climática, a través de la flexibilidad curricular, la integración interdisciplinaria, y la adaptación a nuevos desafíos ambientales.

### 3. RESULTADOS

Los siguientes resultados evidencian

#### 3.1 MODELO CURRICULAR DE REDES COMPLEJAS DE LA CRISIS CLIMÁTICA PARA EL DESARROLLO DEL PRAE.

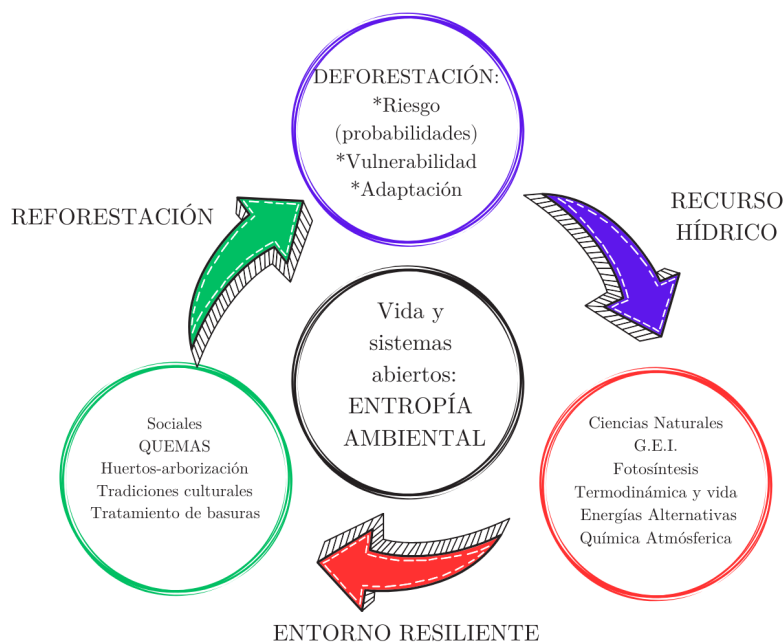
El modelo Curricular de Redes Complejas de la crisis climática para el Desarrollo del PRAE se fundamenta en la interconexión de diversos componentes críticos para enfrentar el cambio climático y promover la sostenibilidad.

El diseño del modelo de la intervención pedagógica se basa en los siguientes componentes ambientales:

- **Crisis climática y Entropía:** Se enfatiza la relevancia de los gases de efecto invernadero (GEI) en el cambio climático. Este enfoque permite a los estudiantes comprender cómo las emisiones de GEI contribuyen a la entropía del sistema climático, destacando la

necesidad de acciones inmediatas y sostenibles.

- **Gestión del Riesgo:** Se contextualiza la dinámica del fenómeno del Niño y la Niña, explicando cómo estos eventos climáticos extremos afectan diversas regiones. La integración de este componente permite a los estudiantes analizar y gestionar riesgos asociados a estos fenómenos, mejorando la preparación y respuesta ante desastres naturales.
- **Deforestación:** Se abordan las causas y consecuencias de la deforestación, vinculándola



**FIG 2. MODELO CURRICULAR DE RED COMPLEJA QUE EXPONE LA CRISIS CLIMÁTICA PARA EL DESARROLLO DEL PRAE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.**

Este enfoque integral no solo conecta áreas curriculares y contenidos, sino que también fomenta la participación activa de los estudiantes en la superación de problemáticas ambientales, desarrollando una conciencia ecológica y una responsabilidad frente a los estados críticos del entorno próximo y lejano de esta nuestra casa común.

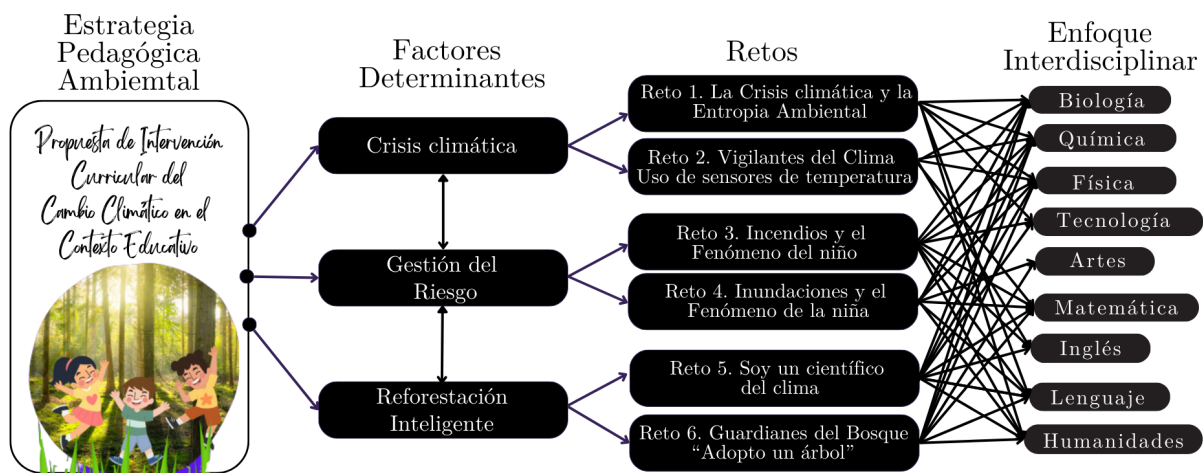
### **3.2 DISEÑO DE UNA PROPUESTA INTERDISCIPLINAR DE INTERVENCIÓN PEDAGÓGICA (PIP) DE LA CRISIS CLIMÁTICA EN EL CONTEXTO EDUCATIVO: GUÍA DE APRENDIZAJE EN EDUCACIÓN AMBIENTAL**

En este sentido, como resultado del proceso de implementación del enfoque de redes complejas de mundo pequeño en el diseño de una propuesta interdisciplinaria de intervención curricular para la crisis climática en el contexto educativo, se desarrolló una guía de aprendizaje en educación ambiental. Este enfoque permitió visualizar y comprender cómo diversos factores socioambientales se interconectan y afectan el entorno escolar. La guía elaborada no solo integró aspectos clave de la crisis climática, sino que también promovió una comprensión holística y dinámica del fenómeno.

Esta propuesta de intervención curricular se diseñó a través del enfoque del paradigma de la complejidad, el cual permite resaltar la importancia de una educación que contextualice el mundo global y complejo en el que vivimos. Este enfoque promueve un aprendizaje desde el territorio, evitando enfoques reduccionistas y lineales.

En este caso particular, la intervención se desarrolló considerando los factores de gases de efecto invernadero (GEI), las quemas y la deforestación asociadas al cambio climático, fenómenos con interrelaciones altamente complejas

La propuesta de intervención pedagógica (PIP), propone integrar áreas curriculares y abordar problemas ambientales, a través de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), (ver figura 3).



**FIG 3. RED CURRICULAR DE LA PROPUESTA DE INTERVENCIÓN PEDAGÓGICA (PIP) DE LA CRISIS CLIMÁTICA PARA EL DESARROLLO DEL PRAE. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA.**

Esta estrategia no solo contextualiza el aprendizaje dentro del entorno local, sino que también fomenta un enfoque no reduccionista y no lineal del conocimiento. Al conectar los contenidos curriculares con problemas ambientales reales, los estudiantes desarrollan habilidades críticas y un compromiso con la sostenibilidad y la mejora de su comunidad.

### 3.3 EVALUACIÓN DE LA ENTROPÍA CURRICULAR DE LA PROPUESTA DE INTERVENCIÓN PEDAGÓGICA (PIP) DE LA CRISIS CLIMÁTICA PARA EL DESARROLLO DEL PRAE: CASO DE ESTUDIO

Para implementar un análisis de entropía en el diseño curricular de los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), se puede recurrir al modelo de entropía de Shannon, (ver ecuación 1). Esta métrica permite medir la incertidumbre o diversidad en la estructura curricular, lo que resulta fundamental para evaluar su capacidad de adaptación y respuesta ante temas complejos como la crisis climática. Al cuantificar la diversidad de componentes educativos relacionados con el cambio climático, la deforestación y la gestión del riesgo, es posible determinar qué tan cohesivo y flexible es el currículo en la formación ambiental de los estudiantes, (Shannon, C. E., 1948), (Obregón N. & Romero C., 2013), (Mitchell, 2021).

- Definición de Componentes de la estructura curricular de la propuesta de intervención Pedagógica (PIP): después de identificar los componentes clave del currículo relacionados con la crisis climática. En la intervención interdisciplinar se consideraron:
  - Contenido sobre Gases de Efecto Invernadero (GEI): la propuesta de intervención incluye dos retos sobre cómo estos gases afectan el clima y las estrategias para reducir sus emisiones, ver figura 3.
  - Gestión del Riesgo Climático (GRC): la propuesta de intervención propone dos retos que aborda la comprensión y la gestión de eventos climáticos extremos como: El Niño y La Niña.
  - Deforestación y Reforestación (DR): la propuesta integra dos retos enfocados en las causas de la deforestación y los métodos para mitigar sus efectos a través de la reforestación.
- Evaluación de la Entropía: En este caso de estudio se ha asignado probabilidades basadas en la capacidad del currículo para adaptar e incorporar nuevas estrategias pedagógicas, estimando la probabilidad  $p(x_i)$ , para cada reto, actividad o laboratorio propuesto en los componentes de la estructura curricular de la intervención pedagógica (PIP). Este valor se basó en la proporción del tiempo dedicado a cada tema o el grado de interacción con los recursos didácticos y el grado de interconexión con las demás áreas del currículo.

Sustituyendo las probabilidades de los componentes de la estructura curricular de la intervención pedagógica (PIP), en el modelo de Shannon (ver ecuación 1) obtenemos el modelo:

$$E(C_{pip}) = -[p(GEI)\text{Log}_2 p(GEI) + p(GRC)\text{Log}_2 p(GRC) + p(DR)\text{Log}_2 p(DR)]; \quad (\text{Ec. 4})$$

Donde:

- $E(C_{PIP})$ , es la entropía total de la estructura curricular de la intervención pedagógica.
- $p(GEI)$ , es la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Gases de Efecto Invernadero (GEI).
- $\text{Log}_2 p(GEI)$ , es el logaritmo en base 2 de la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Gases de Efecto Invernadero (GEI).
- $p(GRC)$ , es la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Gestión del Riesgo Climático (GRC).
- $\text{Log}_2 p(GRC)$ , es el logaritmo en base 2 de la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Gestión del Riesgo Climático (GRC).
- $p(DR)$ , es la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Deforestación y Reforestación (DR).
- $\text{Log}_2 p(DR)$ , es el logaritmo en base 2 de la probabilidad de implementación y resolución de cada reto propuesto en componente sobre Deforestación y Reforestación (DR).

En efecto, si consideramos las siguientes probabilidades implementación de la intervención pedagógica en donde se asigna el 40% del tiempo curricular a actividades relacionadas con los gases de efecto invernadero (GEI), el 30% a la gestión del riesgo climático (GRC) y el 30% restante a la deforestación y reforestación, obtenemos:

$$E(C_{PIP}) = -[0.4\text{Log}_2(0.4) + 0.35\text{Log}_2p(0.30) + 0.25\text{Log}_20.30]; \quad (\text{Ec.5})$$

$$E(C_{PIP}) = -[0.4 \cdot (-1.32) + 0.35 \cdot (-1.74) + 0.25 \cdot (-1.74)]; \quad (\text{Ec.6})$$

$$E(C_{PIP}) = 0.528 + 0.522 + 0.522 = 1.57; \quad (\text{Ec.7})$$

En efecto, el valor de la entropía curricular evidencia un valor de 1.57, por otro lado, teniendo en cuenta la ecuación 2, obtenemos que el valor máximo de entropía curricular para una estructura de tres componentes (n=3) es:

$$E(C_{PIP})_{max} = \text{Log}_2 3 \simeq 1.585; \quad (\text{Ec.8})$$

Por lo tanto, teniendo en cuenta la ecuación 3, el valor porcentual de la entropía curricular para el caso de estudio considerado es.

$$\%E(C_{PIP}) = \frac{E(C_{PIP})}{E(C_{PIP})_{max}} \cdot 100 = \frac{1.57}{1.585} \cdot 100 = 99.05\% \quad (\text{Ec. 9})$$

El valor de entropía obtenido (99.05%) refleja una significativa diversidad y flexibilidad en el diseño de la intervención pedagógica, lo que indica que evidencia una gran capacidad para adaptarse a los distintos factores de la crisis climática en el contexto. Por otro lado,

la integración proporcional de los componentes de la intervención pedagógica promueve una formación integral, fomentando una comprensión interdisciplinar de los fenómenos climáticos. No obstante, este alto nivel de entropía también sugiere que, sin una adecuada organización y metodología en la implementación de las actividades, la estructura curricular podría volverse fragmentada, en este sentido, es importante mantener una cohesión entre las estrategias didácticas, los recursos y las distintas áreas disciplinares que conforman la estructura curricular.

### 3.4 ORIENTACIONES CURRICULARES DE LA CRISIS CLIMÁTICA EN EL CONTEXTO EDUCATIVO

El módulo de intervención curricular se construyó desde una perspectiva de los estándares nacionales, sin embargo, queda abierto en el sentido que puede ser adoptado en otras instituciones del municipio, departamento y el país, donde reconozca la casualidad, la simultaneidad, incertidumbre, la no linealidad y las contradicciones, que conllevan la transformación de la sociedad, asimismo queda para consulta de la comunidad educativa, constituida por docentes y directivos docentes, estudiantes y padres de familia; ya que las actividades desarrolladas son de muy fácil adaptación y comprensión, este módulo puede ser socializado, mejorado, adaptado según las características de sus contextos y proyectos, porque son problemáticas comunes que en su gran parte afectan a nuestra región y país.

En la siguiente tabla se presentan las principales orientaciones curriculares tratadas en esta propuesta y relacionadas con el fenómeno del cambio climático:

**TABLA 1. ORIENTACIONES CURRICULARES. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA**

Componentes del Modelo Curricular	Conceptos Dinamizados	Áreas Curriculares y Estándares
<b>Crisis climática y entropía</b>	Ciclos del carbono y nitrógeno, reacción química de combustión Gases de efecto invernadero (GEI), fotosíntesis, termodinámica y vida, energías alternativas, química atmosférica, Probabilidad de eventos climáticos extremos, análisis estadístico de GEI, interacciones bióticas y abióticas.	<b>Matemática:</b> probabilidad y estadística; <b>Artes:</b> visualización de datos climáticos, proyectos artísticos que representen el cambio. <b>Tecnología:</b> diseño de soluciones tecnológicas sostenibles, desarrollo de aplicaciones y herramientas para la gestión del riesgo y adaptación al cambio climático <b>Química:</b> compuestos orgánicos e inorgánicos, reacciones de fotosíntesis, química ambiental; <b>Física:</b> termodinámica; <b>Geografía:</b> biogeografía, cambios en el uso del suelo; <b>Humanidades:</b> impacto socioeconómico

<b>Gestión del riesgo de las quemas</b>	Fenómeno del Niño y de la Niña, gestión de huertos, tradiciones culturales, gestión responsable de residuos, modelos estocásticos para predicción de fenómenos del Niño y la Niña, análisis de datos históricos, fuentes de energía alternativa, eficiencia energética, estrategias de resiliencia, políticas de adaptación, Agricultura sostenible y seguridad alimentaria.	<p><b>Matemática:</b> procesos estocásticos;</p> <p><b>Artes:</b> visualización artística de diferentes fuentes de energía;</p> <p><b>Tecnología:</b> Energías alternativas, creación de prototipos de dispositivos energéticamente eficientes, sistemas de alerta temprana.</p> <p><b>Química:</b> análisis de contaminantes</p> <p><b>Geografía:</b> distribución de recursos naturales; riesgo y gestión de desastres;</p> <p><b>Humanidades:</b> políticas energéticas, justicia climática</p>
<b>Deforestación</b>	Conservación y restauración de bosques, ecosistemas, servicios ecosistémicos, evaluación probabilística de la pérdida de biodiversidad, análisis de tendencias de deforestación, Principios de reciclaje, reutilización y reducción.	<p><b>Matemática:</b> análisis de tendencias;</p> <p><b>Artes:</b> creación de campañas visuales sobre la importancia de la biodiversidad, arte reciclado y reutilización de materiales.</p> <p><b>Tecnología:</b> uso de tecnologías para el monitoreo y conservación de la biodiversidad, desarrollo de sistemas de reciclaje automatizados</p> <p><b>Química:</b> procesos de reciclaje químico, biotecnología</p> <p><b>Geografía:</b> flujos de materiales</p> <p><b>Humanidades:</b> derechos ambientales, economía sostenible.</p>

Estas directrices proporcionan un marco estructurado para integrar el estudio del cambio climático en todas las áreas curriculares y orientan a los docentes sobre la manera transversal de abordar este fenómeno para la sostenibilidad de la vida. Los componentes del modelo curricular incluyen la definición de objetivos específicos relacionados con la comprensión del cambio climático, la promoción de la sostenibilidad y acciones de resiliencia ambiental.

Los campos del conocimiento dinamizados en las interacciones de esta propuesta curricular: matemática, artes, ciencias naturales, geografía, humanidades y tecnología, enriquecen esta trama interdisciplinaria que advierte a los estudiantes para que desde diferentes perspectivas se comprendan las complejidades ambientales crecientes. Los estándares educativos activados de esta manera refuerzan la necesidad de desarrollar competencias, habilidades y capacidades como la investigación científica, la alfabetización climática y resolución activa de problemas ambientales.

### **Discusión: desafíos y retos**

La implementación de enfoques interdisciplinarios para los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE), a través de redes complejas de mundo pequeño, representa una estrategia transversal que permite contextualizar la complejidad de los problemas ambientales

en las escuelas. Por su parte, estas redes facilitan la integración de diversas disciplinas académicas y actores sociales, promoviendo una visión integral y colaborativa del cuidado ambiental. Sin embargo, su implementación enfrenta desafíos significativos.

La coordinación entre instituciones educativas, entidades gubernamentales y organizaciones no gubernamentales es fundamental, que puede verse obstaculizada por diferencias en agendas y recursos disponibles. Otro reto significativo es la evaluación y medición del impacto real de los PRAE interdisciplinarios, ya que los indicadores de éxito pueden variar según el contexto y las expectativas de los diferentes actores involucrados. A pesar de estos desafíos, el potencial de las Redes Complejas de mundo pequeño para transformar la educación ambiental mediante la integración de conocimientos de abajo hacia arriba y prácticas innovadoras activadas es considerable, ofreciendo una oportunidad única para fortalecer la conciencia ambiental y la acción de las comunidades educativas en sus territorios.

**Desafíos Curriculares básicos de la crisis climática:** establecer directrices curriculares que incorporen los resultados del modelo de redes complejas y la propuesta interdisciplinaria para crear unidades transversales en el currículo, en particular:

- a. Fundamentos básicos de la epigenética, cultura de la biodiversidad que hace sostenible la vida en el suelo, el aire y entre contextos interespecies.
- b. Fundamentos básicos de la bioquímica sustentada en conocimiento de los procesos fotosintéticos y tróficos.
- c. Fundamentos básicos de fisicoquímica sustentada en la termodinámica del no equilibrio, desgaste de energía provocada por la expansión de los gases de efecto invernadero, expresada en la entropía creciente en el contexto abierto de la biosfera.
- d. Fundamentos básicos de biofísica que promueve la práctica en la cultura física y el disfrute educativo no sedentario de la naturaleza.
- e. Fundamentos básicos de la bioeconomía generativa y sostenible a largo plazo de los servicios ecosistémicos para afianzar el bienestar de las comunidades.

Frente a la mitigación y adaptación al cambio climático, estas ideas fundamentales orientadoras explican la interdisciplina creciente de un sistema curricular que activa motivaciones por aprendizajes que hacen indistinguible en la cotidianidad los procesos teóricos o prácticos.

## 4. CONCLUSIONES

Los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) representan una estrategia educativa integral que va más allá de la mera transmisión de conocimientos sobre el cambio climático.



Según investigaciones recientes, como el estudio sobre el enfoque interdisciplinar para el desarrollo de los PRAE, estos programas están diseñados para cultivar habilidades como el pensamiento crítico, la resolución de problemas y la participación de la ciudadanía activa. Estas habilidades no solo empoderan a los estudiantes para comprender y abordar los desafíos ambientales, sino que también los preparan para convertirse en agentes de cambio en sus comunidades.

La entropía educativa en los PRAE se manifiesta a través de la diversidad y complejidad de actividades interdisciplinarias que involucran a múltiples actores educativos y comunitarios. Estos proyectos no se limitan al aula; implican a estudiantes, docentes, padres de familia y miembros de la comunidad en la investigación, la acción y de sensibilización global frente a esta problemática. Esta colaboración activa y multifacética fortalece el aprendizaje significativo al conectar teoría y práctica en contextos reales, promoviendo así un compromiso sostenible con el medio ambiente desde una edad temprana.

Asimismo, la entropía curricular en los PRAE es clave para medir la diversidad y complejidad del currículo, lo que refleja su adaptabilidad frente a la crisis climática. Un currículo con alto valor de entropía promueve una educación flexible y dinámica, capaz de abordar múltiples aspectos del cambio climático, desde la gestión de riesgos climáticos hasta la reducción de GEI y la deforestación. No obstante, esta complejidad debe gestionarse con claridad pedagógica para evitar una pérdida de cohesión en el contenido.

La implementación de Redes Complejas del Cambio Climático en los PRAE es fundamental para optimizar su impacto. Basándose en los principios de las Redes de Mundo Pequeño, estos proyectos pueden gestionar de manera efectiva la información, los recursos y las acciones necesarias para abordar los desafíos ambientales locales. Este enfoque propone una gestión ambiental escolar adaptable y colaborativa, permitiendo a las escuelas adaptarse dinámicamente a las condiciones cambiantes del entorno mientras fomentan una cultura de sostenibilidad.

Entre tanto, este enfoque interdisciplinar no solo genera entre los estudiantes conocimientos contextualizados, sino que también fomenta habilidades y potencialidades esenciales para el ejercicio responsable de la ciudadanía. Al integrar redes complejas y principios de mundo pequeño, estos proyectos se convierten en herramientas poderosas para la transformación educativa y ambiental.

## REFERENCIAS

- Ausubel, p david. (1968). *Education Psychology A Cognitive View*. <http://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.112045>
- Barabasi, A.-L. (2003). *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*.
- Bastian, M. (2009). (PDF) *Gephi: An Open Source Software for Exploring and Manipulating Networks*. [https://www.researchgate.net/publication/221297890\\_Gephi\\_An\\_Open\\_Source\\_Software\\_for\\_Exploring\\_and\\_Manipulating\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/221297890_Gephi_An_Open_Source_Software_for_Exploring_and_Manipulating_Networks)
- Bateson, G. (with Internet Archive). (1979). *Mind and nature: A necessary unity*. New York: Dutton. <http://archive.org/details/mindnatureecess0000bate>
- Bryk, A. S., & Schneider, B. (2002). *Trust in Schools: A Core Resource for Improvement*. Russell Sage Foundation. <https://www.jstor.org/stable/10.7758/9781610440967>
- Candia, C., Pulgar, J., & Pinheiro, F. (2022). *Interconnectedness in Education Systems*.
- Castro Sáez, B. (2001). LA ORGANIZACION EDUCATIVA: UNA APROXIMACION DESDE LA COMPLEJIDAD. *Estudios pedagógicos (Valdivia)*, 27, 97-110. <https://doi.org/10.4067/S0718-07052001000100007>
- Chevalard, Y. (2013). *Chevalard, Y. La Trasposición Didáctica*. <http://archive.org/details/chevalard-y.-la-trasposicion-didactica>
- Dawson, J. L. (2021). *A Guide to Feedback Theory*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781139018289>
- Edgar Morin. (2006). *Morin, Edgar. El Método. Vol. 1. La Naturaleza De La Naturaleza [ocr] [2006]*. <http://archive.org/details/morin-edgar.-el-metodo.-vol.-1.-la-naturaleza-de-la-naturaleza-ocr-2006>
- Fritzsche, H. (2018). Quarks. En H. Fritzsche (Ed.), *Murray Gell-Mann and the Physics of Quarks* (pp. 49-51). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-92195-2\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-92195-2_5)
- Fullan M. (2007). *El nuevo significado del cambio educativo* -. <https://michaelfullan.ca/books/new-meaning-educational-change/>
- Gell-Mann, M. (1994). *Complex Adaptive Systems* (G. Cowan, D. Pines, & D. Meltzer, Eds.; 19; Número 19, pp. 17-45). Addison-Wesley. <https://resolver.caltech.edu/CaltechAUTHORS:20150924-144445402>
- Hattie, J. (2009). *Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement*. En *Visible Learning: A Synthesis of Over 800 Meta-Analyses Relating to Achievement*. <https://doi.org/10.4324/9780203887332>
- Herrington J., Oliver Ron. (2000). *An instructional design framework for authentic learning environments | Educational technology research and development*. <https://link.springer.com/article/10.1007/BF02319856>
- Holland, J. H. (2005). *El Orden Oculto*. Fondo de Cultura Economica USA.
- Holling, C. S. (1973). Resilience and Stability of Ecological Systems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 4(Volume 4, 1973), 1-23. <https://doi.org/10.1146/annu->

rev.es.04.110173.000245

- Korthagen Fred A.J. (2009). Situated learning theory and the pedagogy of teacher education: Towards an integrative view of teacher behavior and teacher learning. *CE-TAR, VU University, Amsterdam, The Netherlands*. chrome-extension://efaidnbmnnnibp-cajpcgclefindmkaj/https://korthagen.nl/en/wp-content/uploads/2018/07/Situated-learning-theory-and-the-pedagogy-of-teacher-education.pdf
- Krajcik j. y Blumenfeld P. (2005). *Project-Based Learning (Chapter 19)–The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*. https://www.cambridge.org/core/books/abs/cambridge-handbook-of-the-learning-sciences/projectbased-learning/355AA45D92D7FCD-5D312FD1C343FDDB2
- Leff, E. (2000). *Saber ambiental: Sustentabilidad, racionalidad, complejidad, poder / E. Leff*.
- Leinster, T. (2020). *Entropy and diversity The axiomatic approach*.
- Maldonado, C. E. (2016). Pensar como la naturaleza. Una idea radical. *Uni-pluriversidad*, 16(2), 41-51.
- Maturana, H. R. (with Internet Archive). (1980). *Autopoiesis and cognition: The realization of the living*. Dordrecht, Holland ; Boston : D. Reidel Pub. Co. http://archive.org/details/autopoiesiscogni0042matu
- Minambiente. (2019). *Guía PRAE*. https://www.minambiente.gov.co/documento-entidad/guia-prae/
- Newman, M. E. J. (2003). The structure and function of complex networks. *SIAM Review*, 45(2), 167-256. https://doi.org/10.1137/S003614450342480
- Penrose Roger , Jorgensen Palle. (2008). *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. https://www.researchgate.net/publication/226597688\_The\_Road\_to\_Reality\_A\_Complete\_Guide\_to\_the\_Laws\_of\_the\_Universe
- Perkins, D. (2009). *Making learning whole: How seven principles of teaching can transform education: Perkins, David N : Free Download, Borrow, and Streaming: Internet Archive*. https://archive.org/details/makinglearningwh0000perk
- Perkins, D. (2023). *Perkins, D. Educar Para Un Mundo Cambiante ¿ Qué Necesitan Aprender Realmente Los Alumnos Para El Futuro*. http://archive.org/details/perkins-d.-educar-para-un-mundo-cambiante-que-necesitan-aprender-realmente-los-a
- Prigogine, I. (1997). *Prigogine, Ilya. Las Leyes Del Caos [ocr] [1997]*. http://archive.org/details/prigogine-ilya.-las-leyes-del-caos-ocr-1997
- Prigogine, I., & Rysselberghe, P. V. (1963). Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes. *Journal of The Electrochemical Society*, 110(4), 97C. https://doi.org/10.1149/1.2425756
- Shannon, C. E. (1948). *A Mathematical Theory of Communication*.
- Stiggins, R. (2005). From Formative Assessment to Assessment for Learning: A Path to Success in Standards-Based Schools. *Phi Delta Kappan*, 87(4), 324-328. https://doi.org/10.1177/003172170508700414

## REFERENCIAS

- Teilhard de Chardin. (1969). *Teilhard de Chardin, El-Fenomeno-Humano.pdf*. <https://1library.co/document/y65j417z-teilhard-de-chardin-el-fenomeno-humano-pdf.html>
- UNESCO. (2003). *La Educación ambiental: Pilar de un desarrollo sostenible—UNESCO Biblioteca Digital*. [https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000132190\\_spa](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000132190_spa)
- Walker, B., Holling, C. s, Carpenter, S., & Kinzig, A. (2003). Resilience, Adaptability and Transformability in Social-Ecological Systems. *Ecol. Soc.*, 9. <https://doi.org/10.5751/ES-00650-090205>
- Watts, D. J., & Strogatz, S. H. (1998). Collective dynamics of «small-world» networks. *Nature*, 393(6684), 440-442. <https://doi.org/10.1038/30918>
- Wilensky, U; Randall. (2015). *Introducción al modelado basado en agentes: Modelado de sistemas naturales, sociales y complejos diseñados con NetLogo | Libros electrónicos de MIT Press | Exploración IEEE*. <https://ieeexplore.ieee.org/book/7109293>
- Yakman, G., & Marketing, S. (2017). *STEAM Education Professional Development Practicum & Research*. [https://www.academia.edu/33856479/STEAM\\_Education\\_Professional\\_Development\\_Practicum\\_and\\_Research](https://www.academia.edu/33856479/STEAM_Education_Professional_Development_Practicum_and_Research)