RECONOCIENDO LA TEORÍA DEL CAOS Y EL EFECTO MARIPOSA A TRAVÉS DE LAS NARRATIVAS CINEMATOGRÁFICAS COMO RECURSO DIDÁCTICO EN EL AULA DE FISICA

SERGIO DAVID ALARCÓN MORENO

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

LICENCIATURA EN FÍSICA

2026

RECONOCIENDO LA TEORÍA DEL CAOS Y EL EFECTO MARIPOSA A TRAVÉS DE LAS NARRATIVAS CINEMATOGRÁFICAS COMO RECURSO DIDÁCTICO EN EL AULA DE FISICA

SERGIO DAVID ALARCÓN MORENO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE LICENCIADO EN FÍSICA

ASESOR

JHON WILSON CALDERON DEVIA

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA NACIONAL

FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

LICENCIATURA EN FÍSICA 2026

BOGOTÁ, 2026

Dedicatoria

A mi madre Claudia Moreno y a mi Padre Fernando Alarcón
por ser las primeras personas en creer en mí
quienes con su amor me enseñaron y permitieron ser alguien
por enseñarme a no desfallecer y creer en mis sueños
incluso más que yo, a ellos gracias.

A mi hermano Jeisson Alarcón por ser la primera inspiración
por ser la luz que guio este camino.

A mi abuelito Fernando que, aunque no me esperó
sé que desde arriba me acompañó en este viaje
por ser el primer profesor que me marcó la vida.

A mi abuelita Edelmira por haberme esperado
por confiar en que lo haría.

A Jennifer, Luisa, Karen y Santiago por haber sido esos compañeros
en quienes me refugie cuando sentía que no podía mas
con quienes emprendí este camino que nos unió.

A Zamira, la flor que nunca pedí y hoy florece como un alelí

Y al mismo caos que me llevó a la pedagógica.

Agradecimientos

A todos los profesores que hicieron parte de este proceso, quienes forjaron en mi un carácter apasionado del profesional que quiero ser, quienes con su paciencia me enseñaron y me ayudaron a crecer como persona.

A los profesores que forman parte de esta por enseñarme tanto el valor que se tiene al ser profesor.

Al Profesor Ronal por ser el primero en creer en este proyecto y sentar las bases para lograrlo.

Al profesor Jhon por confiar y motivarme a finalizarlo.

A todos los que hicieron parte de este camino, que aún están y a los que ya no están.

A la pedagógica por adoptarme y brindarme un segundo hogar.

"Cada enseñanza, cada decisión, cada hilo que tendemos en el aula puede transformar el aprendizaje, igual que una mariposa cambia el aire con su aleteo"

Sergio Alarcón.

Contenido

Lista de tablas 6
Lista de anexos 6
Introducción 8
CAPÍTULO I 10
Contexto y problemática. 10
Planteamiento del problema 12
Objetivo general 13
Objetivos específicos 14
Pertinencia del estudio 14
Antecedentes 16
CAPÍTULO II 20
Marco teórico 20
¿Qué es la narrativa? 20
La narrativa como recurso didáctico 20
Ventajas y desafíos del uso del cine en la enseñanza de la física 22
Determinismo 24
El formalismo matemático y el origen de la dificultad cognitiva. 25
Condiciones iniciales 26
Orígenes y fundamentos de la teoría del caos 27
La metáfora del efecto mariposa y su interpretación 28
Sistemas dinámicos 30
Formalización matemática de los sistemas caóticos a partir de un sistema meteorológico. 31
Secciones y mapeo de Poincaré 34
Péndulo doble como sistema físico. 36
El cine como medio de representación de conceptos científicos 38
Análisis de películas que abordan el efecto mariposa y el caos 39
Análisis de la película *El efecto mariposa [The Butterfly Effect]* (Bress & Gruber, 2004) 39
Análisis de la película *Mr. Nobody* (Dormael, 2009) 41
Escenas escogidas 44

CAPÍTULO III 48
Metodología 48
Contexto y población 49
Diseño de la implementación 50
CAPÍTULO IV 55
Técnicas de recolección y análisis de datos 55
Análisis actividad inicial #1 (Escenas de películas) 55
Análisis actividad inicial #2 (síntesis de las películas) 57
Análisis actividad de desarrollo #3 58
Análisis actividad de cierre #4 64
Análisis de segunda secuencia de actividades (Comunidad de indagación) 66
Conclusiones 67
Bibliografía 73
Anexos 76

Lista de tablas

Tabla 1 Síntesis de la película The Butterfly Effect (Bress & Gruber, 2004) 40
Tabla 2 Síntesis de la película Mr. Nobody (Dormael, 2009) 43
Tabla 3 cuadro de análisis físico 46
Tabla 4 Resumen secuencia de actividades #1 51
Tabla 5 resumen secuencia de actividades #2 52
Tabla 6 Análisis actividad inicial #1 56
Tabla 7 Análisis de respuestas Actividad #3 60

Lista de anexos

Anexo 1 Diseño de la secuencia de actividades #1 76
Anexo 2 Diseño de la secuencia de actividades #2 78
Anexo 3 Actividad #2 actividad inicial de apertura #2 82
Anexo 4 actividad #1 actividad de apertura #2 83

Anexo 5 Tabla de respuestas actividad inicial #1 de la secuencia de actividades #1 84
Anexo 6 Tabla de respuestas actividad inicial #2 de la secuencia de actividades #1 85
Anexo 7 Tabla de respuestas actividad inicial #2 de la secuencia de actividades #1 87
Anexo 8 Tabla de respuestas Actividad #3 secuencia de actividades #1 89
Anexo 9 Tabla de respuestas Actividad #3 secuencia de actividades #1 92
Anexo 10 tabla de respuestas Actividad # 4 cierre secuencia de actividades #1 94
Anexo 11 Mapa de decisiones planteado por el docente para la actividad inicial #2 96
Anexo 12 Tabla de respuestas secuencia de actividades #2 97

Introducción

La enseñanza de la física, desde su tradición clásica, ha estado profundamente marcada por el pensamiento determinista inaugurado por Isaac Newton y consolidado por Laplace. En este marco, el universo se entendía como una gran máquina regida por leyes inmutables que, de conocerse completamente, permitirían predecir con exactitud el curso de todos los fenómenos naturales. Sin embargo, los avances de la física moderna, especialmente el surgimiento de la teoría del caos y el estudio de los sistemas dinámicos no lineales, han transformado esta visión al demostrar que incluso en sistemas gobernados por leyes deterministas puede emerger un comportamiento impredecible. La noción de sensibilidad a las condiciones iniciales cuestiona la idea de un universo perfectamente predecible y abre la posibilidad de comprender el mundo desde la complejidad, el cambio y la incertidumbre. En este contexto, la presente investigación se estructura en cuatro capítulos principales. En el **Capítulo 1, Contexto y Problematización**, se expone el planteamiento del problema, los objetivos de la investigación y la pertinencia pedagógica de introducir conceptos de complejidad en la educación básica secundaria, el **Capítulo 2, Marco Teórico**, se desarrolla el abordaje conceptual desde la física, detallando la transición del mecanicismo determinista hacia la Teoría del Caos, la sensibilidad a las condiciones iniciales y sus implicaciones epistemológicas, Por su parte, el **Capítulo 3, enfoque metodológico de la investigación**, describe la metodología empleada y justifica el uso de las narrativas cinematográficas de ciencia ficción como un recurso didáctico potente para materializar estos conceptos abstractos. En el **Capítulo 4, Análisis de Resultados y conclusiones,** se presenta el diseño de las actividades de aula y se analizan las reflexiones y construcciones de sentido que lograron los estudiantes en torno a la predictibilidad, por último, se exponen las conclusiones, los alcances didácticos de la propuesta y las recomendaciones para futuras implementaciones. Con base en estos capítulos esta investigación propone una mirada didáctica hacia la enseñanza de estos conceptos, partiendo de la necesidad de que los estudiantes comprendan la física no solo como un conjunto de leyes abstractas, sino como una construcción cargada de significado. Para ello, se plantea una secuencia de actividades que busca acercar a los estudiantes a los conceptos de determinismo y sistemas caóticos mediante el uso de recursos narrativos y cinematográficos, en particular a través del análisis de las películas *El efecto*

mariposa (2004) y *Mr. Nobody* (2009). Estos relatos de ciencia ficción ofrecen una metáfora potente para abordar los principios de causalidad, bifurcación y sensibilidad a las condiciones iniciales, al tiempo que estimulan la reflexión filosófica sobre el tiempo, las decisiones y la imprevisibilidad de los sistemas.

La investigación se enmarca dentro de un enfoque cualitativo descriptivo, que busca comprender las concepciones de los estudiantes frente a las relaciones entre ciencia, causalidad y cambio, a partir de la observación, el análisis de contenido y la reflexión colectiva.

De esta manera, el trabajo busca contribuir a la enseñanza de la física desde una perspectiva interdisciplinar, donde la ciencia se vincula con la narrativa. La integración de las narrativas cinematográficas como recurso didáctico permite reconocer que los fenómenos caóticos, además de ser conceptos científicos, pueden ser también experiencias humanas que revelan la complejidad de nuestras propias decisiones y del mundo que habitamos. Por ende, esta investigación no solo busca fortalecer un desarrollo conceptual por parte de los estudiantes, sino también evaluar el impacto de las narrativas cinematográficas en la educación.

CAPÍTULO I

Contexto y problemática.

La problemática que articula esta investigación surge en un escenario específico: la Institución Educativa Francisco Primero S.S., entidad pública ubicada en la localidad de Barrios Unidos, en el barrio Siete de Agosto de la ciudad de Bogotá. Si bien este contexto escolar brinda la población objetiva para el pilotaje y la recolección de la evidencia, la presente investigación trasciende del marco de una experiencia didáctica al estructurar un modelo teórico metodológico replicable sobre la enseñanza de la física no lineal y la teoría del caos en la educación básica secundaria. La problemática en cuestión se encuentra presente en el siguiente índice que aborda el planteamiento del problema (*ver el siguiente ítem, pág. 12*) se evidenció durante el acompañamiento como docente en formación, desde la práctica educativa de una clase de astronomía con énfasis en inglés, con estudiantes de octavo grado, en el marco de un proyecto de bilingüismo con énfasis en astronomía. En estas clases, el profesor explicaba la teoría del Big Bang, lo que dio pie a la discusión de algunas condiciones relativistas, provocando una actitud positiva por parte de los estudiantes. Este tema, aunque no estaba previsto en los contenidos de la clase, captó su interés, desde aquí surge el interés por diseñar estrategias que les posibiliten a los estudiantes reconocer y aplicar teorías de fenómenos físicos.

El profesor titular utilizó la imaginación de los estudiantes apoyado en analogías basadas en películas y series para explicar algunos fenómenos del universo, lo cual despertó el interés investigativo por explorar cómo las narrativas cinematográficas pueden servir para abordar conceptos científicos complejos. Sin embargo, en la enseñanza de fenómenos físicos complejos, como los sistemas dinámicos y la teoría del caos, se evidencian dificultades en la comprensión conceptual por parte de los estudiantes, especialmente cuando se abordan desde enfoques abstractos y altamente formalizados. Abordar la teoría del caos en este contexto educativo resulta plenamente pertinente y necesario para la formación científica en la educación básica secundaria. Si bien los contenidos de la física escolar suelen centrarse de forma exclusiva en modelos lineales y mecánicos de carácter determinista tales como el movimiento rectilíneo o las leyes de Newton, los Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales exigen que el estudiante de este ciclo comprenda que los modelos científicos son aproximaciones que cambian en el tiempo y aprenda a explicar la dinámica de sistemas complejos e interdependientes. Por lo que introducir la

teoría del caos en el grado octavo de la institución Francisco Primero S.S. permite a los estudiantes cuestionar la noción intuitiva de predictibilidad absoluta. Esto promueve el pensamiento crítico y la flexibilidad cognitiva al demostrar que el universo no funciona como una máquina perfectamente predecible de manera lineal como lo plantea el determinismo clásico. El estudio del efecto mariposa sirve aquí como un puente fenomenológico y metafórico que expande la comprensión de la causalidad, preparando al estudiante para interpretar fenómenos cotidianos y de las ciencias biológicas o meteorológicas desde la incertidumbre y la complejidad estructural, habilidades clave requeridas para el desarrollo del pensamiento crítico y abordar la fisica desde la cotidianidad. Ante esta dificultad, el uso de analogías y narrativas cinematográficas emerge como una estrategia didáctica potencial para facilitar la comprensión de conceptos complejos, al conectar el contenido científico con referentes culturales cercanos a los estudiantes.

En particular, se plantea el estudio de la teoría del caos desde los sistemas dinámicos, utilizando las analogías y la posibilidad de la imaginación presentes en narrativas cinematográficas para abordar conceptos fundamentales como el efecto mariposa. Esta intención investigativa busca evaluar la apropiación conceptual de los estudiantes sobre los fenómenos físicos no lineales. Dicha apropiación se evidencia a través de categorías observables como, la capacidad de identificar las inconsistencias o límites de la analogía cinematográfica distinguiendo la ficción de la física real, la diferenciación explícita entre el caos determinista y el azar, por último, la producción argumentativa y gráfica en las guías de indagación y discusiones guiadas en el aula, en coincidencia como lo señalan autores como (Hurtado, 2015).

La teoría del caos, que a menudo se percibe como abstracta y de difícil comprensión, ya que como señala (Briggs, 2001) el caos no debe entenderse como desorden, sino como un tipo de orden oculto que se manifiesta a través de comportamientos aparentemente impredecibles, lo que presenta una persepción de díficil comprensión, sin embargo esta puede ser desmitificada a través de ejemplos visuales y narrativos, permitiendo que los estudiantes se acerquen a conceptos científicos avanzados desde una perspectiva más cercana y cotidiana. En este sentido, explorar su enseñanza en la educación secundaria mediante el uso de películas y series que ejemplifican una metáfora utilizada para ilustrar la dinámica caótica, el "efecto mariposa" no solo facilita la comprensión de los sistemas dinámicos, sino que también contribuye a despertar el interés y la motivación de los estudiantes por las ciencias. Este enfoque, por tanto, se inserta en el marco de

la investigación con el objetivo de generar nuevas estrategias didácticas que promuevan la enseñanza de teorías científicas complejas en niveles educativos donde aún no se ha explorado suficientemente.

Planteamiento del problema

En la didáctica de las ciencias naturales, diversos autores como (Gil, 2005) y (Castellón, 2007) han documentado que la enseñanza tradicional de la física se basa en una visión deformada de la ciencia, caracterizada por un determinismo mecanicista donde los fenómenos se presentan como lineales, predecibles y aislados de la complejidad cotidiana. En los currículos escolares prevalece la enseñanza de sistemas ideales, sistemas como los bloques sin fricción, trayectorias perfectamente parabólicas, trayectos uniformes, lo cual genera en los estudiantes la concepción errónea de que el universo funciona de manera completamente controlable y predecible.

Abordar la teoría del caos en el aula no responde a una elección arbitraria o a la simple búsqueda de un contenido novedoso, sino a una necesidad epistemológica y formativa, de la mano con la innovación curricular. Gran parte de los fenómenos naturales a los que el estudiante se enfrenta a diario desde la variabilidad del clima hasta dinámicas biológicas o sociales son inherentemente no lineales y caóticos. Limitar la formación escolar a modelos lineales impide que el estudiante desarrolle un pensamiento crítico frente a la complejidad del mundo real.

No obstante, la inclusión de los sistemas dinámicos no lineales en la educación básica enfrenta barreras significativas. Por un lado, existe una escasez de mediaciones didácticas que traduzcan el formalismo matemático complejo a representaciones conceptuales e intuitivas accesibles para estudiantes de secundaria. Por otro lado, persiste una baja integración de recursos culturales e interactivos como lo son las narrativas y que permitan tender un puente entre la intuición del estudiante, la metáfora visual y la rigurosidad científica. Asimismo, no se destaca suficientemente la conexión de la teoría del caos con otras disciplinas. Todo este contexto de aislamiento se evidencia en las aulas de educación básica cuando la física se fragmenta y se enseña de forma apartada cada uno de los fenómenos naturales y sociales. Al no hacer visibles estas conexiones, el estudiante percibe la física como un conjunto de fórmulas estáticas y abstractas**,** totalmente separadas de las ciencias naturales o sociales.

Además, en este contexto se evidenció que existe una escasez de material pedagógico accesible como guías de laboratorio no tradicionales, talleres basados en el análisis de sistemas no lineales o mapas con bifurcaciones y gráficas amigables para estudiantes de secundaria, por otro lado, la mayoría de los recursos didácticos sobre la teoría del caos están escritos a un nivel técnico avanzado, lo que dificulta tanto a profesores como a estudiantes el acceso a este material. No obstante, hay que hacer diferenciación entre la ciencia real y la ficción ya que se establece un marco metodológico a través de la mediación pedagógica y el diseño de actividades. El aula naturalmente no adopta la lógica de la película de manera analítica, por el contrario, las tramas de *The Butterfly Effect* (Bress & Gruber, 2004) o *Mr. Nobody* (Dormael, 2009) se utilizan como escenarios problematizadores donde se invita al estudiante a realizar el análisis de la narrativa cinematográfica con el modelo físico. Por ejemplo, al analizar cómo un pequeño cambio altera drásticamente el futuro del personaje, ya que se discute el concepto cualitativo de sensibilidad a las condiciones iniciales, pero inmediatamente se delimita la imposibilidad física de viajar en el tiempo o la existencia de un determinismo estricto en el cual ya está linealmente desarrollado el sistema. Así, la ficción no genera confusión, sino que actúa como un mediador epistemológico provocado que obliga al estudiante a argumentar, evaluar evidencias y construir los límites de los modelos científicos frente a las representaciones culturales que podrían representar las bifurcaciones de la narrativa.

Finalmente, tras una revisión del estado del arte en repositorios y bases de datos como Google académico, se evidencia que la disponibilidad de recursos en español es limitada, lo que complica aún más la enseñanza efectiva de la teoría del caos a un público más amplio. Considerando esta problemática, se plantea la siguiente pregunta que guiará esta investigación:

¿Cómo pueden las narrativas cinematográficas favorecer a la enseñanza de la teoría del caos recurriendo a la metáfora del efecto mariposa al abordar su complejidad conceptual y abstracta en la educación secundaria?

Objetivo general

Evidenciar la conveniencia del uso de las narrativas cinematográficas como recurso didáctico para la comprensión de conceptos fundamentales de la teoría del caos en la enseñanza de la física.

Objetivos específicos

1. Identificar las principales dificultades que enfrentan los estudiantes de secundaria, para la comprensión de conceptos fundamentales de la teoría del caos, tales como: no linealidad, sistemas dinámicos y condiciones iniciales.
2. Analizar cómo las narrativas cinematográficas pueden representar visualmente los fenómenos asociados a la teoría del caos, destacando su potencial para clarificar conceptos que fundamentan la teoría del caos.
3. Evaluar el impacto del uso de narrativas cinematográficas como recurso didáctico en la motivación y comprensión de los estudiantes sobre la teoría del caos en el contexto de la enseñanza de la física.

Pertinencia del estudio

El uso de recursos como las narrativas cinematográficas científicas, dramáticas o de ciencia ficción ofrece una excelente oportunidad para la enseñanza de conceptos complejos como la teoría del caos, (Carrera, 2023) sostiene que los recursos audiovisuales permiten visualizar fenómenos físicos complejos que, de otro modo, permanecen abstractos para el estudiante. Estas narrativas permiten ser utilizadas de forma didáctica, brindando un apoyo valioso para explicar fenómenos científicos en el aula. Las narrativas cinematográficas presentan un entorno controlado en el que los espectadores pueden explorar las consecuencias de fenómenos caóticos. Al emplear personajes y situaciones ficticias, es posible analizar y debatir la teoría del caos de manera más accesible, sin la necesidad de recurrir a un análisis matemático riguroso.

Como recurso didáctico, las narrativas cinematográficas facilitan el proceso de enseñanza y aprendizaje al actuar como entornos de simulación mental para conceptos complejos. De acuerdo con (Petit y Solbes, 2012) el cine de ciencia ficción ofrece un potencial didáctico idóneo para confrontar las concepciones alternativas del alumnado de secundaria y mejorar su actitud hacia los avances científicos. En el caso específico de la teoría del caos, el uso de las narrativas cinematográficas no pretende sustituir la rigurosidad de la física, sino proporcionar un anclaje fenomenológico a través del efecto mariposa. Esto permite conectar la física con estructuras causales narrativas que resultan familiares para los estudiantes, despertando su interés sin caer en la pasividad del estudiante que solo escucha y no participa activamente. Desarrollar la teoría del caos en la educación secundaria bajo este enfoque representa una valiosa oportunidad pedagógica

para propiciar una comprensión cualitativa de la física. Siguiendo a (Hewitt, 2016) en su libro de *Física Conceptual*, es metodológicamente válido y necesario que un estudiante de educación básica apropie los principios fundamentales de la naturaleza como la no linealidad y la sensibilidad a las condiciones iniciales, antes o en lugar de una formalización matemática avanzada. Esta comprensión de carácter cualitativo se evidencia en el aula mediante el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico, la ficción de películas como *The Butterfly Effect* o *Mr. Nobody* no genera confusión, sino que actúa como el escenario problemático donde el estudiante debe argumentar, evaluar las variables y deconstruir los errores de la película para delimitar, por contraste, el alcance real del modelo científico.

Esta investigación sobre el uso de narrativas cinematográficas como recurso didáctico ofrece varias contribuciones significativas. En primer lugar, propone una innovación pedagógica en la enseñanza de la física, introduciendo una metodología novedosa que enriquecerá las técnicas tradicionales. Al utilizar el cine como herramienta didáctica, se hace la física más atractiva y accesible, ayudando a clarificar conceptos fundamentales asociadas a la comprensión de metáforas como el "efecto mariposa". El fomentar el desarrollo de estos conceptos permite estimular el pensamiento crítico y conectar la ciencia con la cotidianidad, este enfoque convierte el aprendizaje de ideas abstractas en una experiencia más participativa y eficaz, diversos autores como (Camaño, 2012; Gallego, 2012; Carrera, 2023; Koval, 2022) coinciden en que el uso de narrativas, particularmente audiovisuales, favorece la participación activa del estudiante y facilita la comprensión de conceptos abstractos. En el caso de la teoría del caos, cuya naturaleza dinámica y no lineal dificulta su abordaje exclusivamente formal, la narrativa permite transformar el aprendizaje en una experiencia más participativa y eficaz

El enfoque didáctico específico que se plantea en este documento para la enseñanza de la teoría del caos se centra en el uso de narraciones cinematográficas como recurso didáctico. Muchas narrativas cinematográficas abordan la teoría del caos de manera implícita, sin ofrecer una explicación clara del fenómeno. Sin embargo, se ha logrado identificar varias producciones cinematográficas en las que este concepto se explora, ya sea de manera implícita o explícita, como es el caso de las siguientes películas:

- ***The Butterfly Effect*** (Bress & Gruber, 2004)
- ***Mr. Nobody*** (Dormael, 2009)

El uso las narrativas cinematográficas es un gran recurso para facilitar el aprendizaje de conceptos abstractos de la física, ya que permitió a los estudiantes visualizar conceptos y teorías complejas como lo es la teoría del caos y vincular estas situaciones con narrativas más comprensibles y atractivas para los estudiantes “los relatos, convencen por su semejanza con la vida, en cuanto no establecen la verdad, sino la verosimilitud.” (Gallego, 2012, p.145)

Antecedentes

La teoría del caos es una rama de la matemática y la física que estudia el comportamiento de sistemas dinámicos sensibles a condiciones iniciales. Un ejemplo común es la metáfora del efecto mariposa, que sugiere que pequeñas variaciones pueden generar resultados radicalmente diferentes. La teoría del caos comenzó a desarrollarse a mediados del siglo XX, fue introducida formalmente por el meteorólogo Edward Lorenz en la década de 1960 mientras trabajaba en modelos climáticos. Lorenz descubrió que pequeños cambios en los datos iniciales de su simulación climática producían resultados completamente diferentes. Aunque inicialmente el caos fue considerado una anomalía, con el tiempo se reconoció como un principio importante en muchas áreas de la ciencia, la importancia de entender la teoría del caos radica en que muchos sistemas que encontramos en la naturaleza y en la tecnología son caóticos. Esta teoría nos permite modelar y predecir comportamientos que antes se consideraban impredecibles, lo que tiene implicaciones en distintas áreas de las ciencias.

Previamente existen investigaciones sobre el uso de las analogías y narrativas en la enseñanza de la física. Sin embargo, tras realizar una revisión sistemática en bases de datos académicas Google Académico y el repositorio institucional de la Universidad Pedagógica Nacional, utilizando descriptores combinados como Teoría del Caos, Efecto Mariposa, Enseñanza de la Física, Cine de Ciencia Ficción y Educación Secundaria, se evidenció una marcada escasez de propuestas didácticas en idioma español centradas específicamente en este fenómeno para la educación básica. La mayoría de los hallazgos vinculan el cine con la física cuántica o la relatividad, por lo cual se constata la falta de textos apropiados que aborden la no linealidad a nivel escolar. En consecuencia, los siguientes autores se retoman como referentes directos que fundamentan la pertinencia de esta investigación:

- El trabajo investigativo de la Universidad Pedagógica Nacional, titulado: “Producciones cinematográficas de superhéroes como recurso didáctico para la enseñanza de la física” (Carrera, 2023).Este trabajo monográfico emerge como resultado del desarrollo de una investigación documental que tiene como propósito configurar las películas de ciencia ficción de superhéroes en un recurso didáctico para la enseñanza de la física. Para su desarrollo se realiza una búsqueda y análisis a investigaciones previas relacionadas con el uso de los filmes de superhéroes en procesos de enseñanza de las ciencias, y en especial de la física. Desde allí, se logran identificar tres líneas de interés investigativo y didáctico, las cuales se centran principalmente en el análisis del cine de superhéroes como recurso didáctico, exploración de estrategias didácticas asociadaslas y evaluación del impacto en la comprensión del estudiantado, estas lineas permiten evidenciar elementos correspondientes y relevantes que permiten reconocer, tratar y proponer a estas producciones para la enseñanza de la física. (Carrera, 2023).

Este trabajo investigativo señala una importante investigación acerca del uso de las narrativas cinematográficas, explora cómo las narrativas de ciencia ficción basadas en cómics pueden ayudar a los estudiantes a interesarse y comprender mejor los fenómenos físicos, la autora revisa diversos trabajos que han abordado el uso de películas de ciencia ficción para la enseñanza de ciencias, analizando elementos como la veracidad científica de las producciones y su capacidad de motivar a los estudiantes.

- El artículo de revista procedente de la universidad Santo Tomas, titulado: *“*la función de la narrativa en la ciencia y la investigación pedagógica” (Gallego, 2012). El presente paper es producto de investigación en el curso de Posdoctorado en Ciencia y Narrativa, dentro del convenio entre la Universidad de Córdoba (Argentina) y la Universidad Santo Tomás de Bogotá (Colombia). Se propone indagar, en primer lugar, el papel que cumple la narrativa en las teorías de la ciencia, especialmente en la física, pero también en la construcción de las ciencias sociales y humanas; y en segundo lugar, si la investigación en educación y pedagogía puede hacer uso de la narrativa, entendida como un género literario, que le va a permitir la construcción de conocimientos con validez científica y como estrategia didáctica en los procesos de enseñanza-aprendizaje para el maestro. (Gallego, 2012)

En este trabajo el autor examina la función de la narrativa en la construcción del conocimiento científico, particularmente en la física, y su proyección en la investigación pedagógica. Gallego sostiene que, aunque la ciencia se concibe tradicionalmente como objetiva, ha recurrido históricamente a recursos narrativos como los experimentos imaginarios y la ciencia ficción, para formular teorías, comunicar ideas complejas y favorecer su enseñanza, Gallego asocia como los experimentos imaginarios funcionan como historias conceptuales que permiten pensar lo que no es directamente observable. Para el autor, esto demuestra que incluso en las ciencias exactas el conocimiento no se construye únicamente con fórmulas, sino también mediante formas narrativas que organizan la experiencia y el razonamiento.

- El trabajo investigativo de origen brasileño titulado: “Teoria do caos no cinema” (Marque, s.f.). El propósito de este blog es ofrecer al público en general la oportunidad de entender la Teoría del Caos de una manera sencilla y objetiva. Tal entendimiento es extremadamente importante, teniendo en cuenta que vivimos y luchamos con la teoría todos los días de nuestras vidas, en diferentes momentos. Con cada decisión o elección que nosotros tomamos, nosotros definimos nuestro camino. De tales elecciones, otras situaciones se crearán, se tomarán direcciones, etc. (Marques, s.f.).

El trabajo tiene como objetivo principal presentar de manera sencilla y accesible los principios de la Teoría del Caos y cómo estos se reflejan en el cine, destacando cómo ciertas películas han integrado estos conceptos en sus narrativas para mostrar la imprevisibilidad y complejidad del mundo. A lo largo del documento, se revisan películas clave como *Alta Frecuencia*, *Corra Lola Corra*, *De Volver al Futuro*, *Efecto Mariposa*, entre otras, mostrando cómo cada una representa elementos de la teoría.

La revisión de estos antecedentes no solo permite mapear el estado del arte, sino que aporta elementos teóricos y metodológicos cruciales para el desarrollo de esta investigación ya que aportan a esta investigación, demostrando que el cine de ciencia ficción es un mediador eficaz para movilizar ideas intuitivas en los estudiantes. No obstante, el presente trabajo de grado se distancia de los antecedentes encontrados al desplazar el foco de las teorías físicas tradicionalmente abordadas a través del cine hacia la teoría del caos y la ruptura del determinismo clásico en la educación básica secundaria. De este modo, los aportes metodológicos revisados se toman como base para estructurar una didáctica innovadora, adaptada conceptualmente para el

grado octavo, donde las narrativas de *The Butterfly Effect* y *Mr. Nobody* no operan como simples ilustraciones o representaciones visuales fenomenológicas, sino también como el motor de la argumentación cualitativa en el aula.

CAPÍTULO II

Marco teórico

¿Qué es la narrativa?

Partiendo desde "¿qué es una narrativa?" podemos decir de esta que es un relato literal o discurso utilizado para contar una secuencia de eventos, por lo que (Gallego, 2012) propone como la narrativa puede ser empleada para que a través del uso de estos relatos se puedan explicar conceptos complejos, es decir que se destaca el uso de las narrativas como estrategia metodológica y epistemológica para investigar y enseñar, permitiendo captar una variedad en los procesos educativos que no puedan expresarse únicamente a través de los métodos científicos tradicionales, en este sentido, si bien el método científico resulta pertinente en procesos educativos orientados a la medición, comparación y verificación de resultados, existen las experiencias subjetivas, los significados construidos por los sujetos y los contextos socioculturales, que no pueden ser comprendidas plenamente desde una perspectiva exclusivamente científica. En estos casos, la narrativa se constituye como una estrategia metodológica y epistemológica complementaria para investigar y enseñar. Por lo que podemos hacer uso de la narrativa como una herramienta para explicar teorías complejas y facilitar la comprensión a través de historias, el uso de analogías y ejemplos imaginarios o descripciones audiovisuales detalladas, ya que, al combinar elementos presentados en estas narrativas, tales como sonido y representaciones visuales, se lleva a cabo una comprensión diferente acerca de los fenómenos en la fisica. De igual forma, como dice (Camaño, 2012) sostiene que la narrativa se constituye en una estrategia central para la enseñanza porque organiza el conocimiento en secuencias significativas, facilitando que los estudiantes comprendan conceptos a partir de relaciones causales, temporales y contextuales. Desde esta perspectiva, la narrativa favorece una participación del estudiante, quien no solo recibe información, sino que interpreta, anticipa y reconstruye el sentido de los contenidos, lo que resulta especialmente pertinente en la enseñanza de fenómenos físicos.

La narrativa como recurso didáctico

Para hablar de recurso didáctico debemos hacer referencia a cualquier material o herramienta que utilizamos como apoyo pedagógico para reforzar en la presentación de contenidos, de esta forma según (Moya, 2010) un recurso didáctico es todo material o medio que apoya la labor docente,

facilitando y optimizando el proceso de enseñanza, donde los recursos didácticos deben tener una correcta selección y utilización de los mismos, esto para condicionar una eficacia en el proceso formativo.

Entre este material se señalan importantes recursos didácticos, los cuales se encuentran clasificados por material textual, material audiovisual, medios informáticos, junto con otros, entre el material audiovisual encontramos cualquier proyectable, ya sea películas, videos, *reels* (videos cortos), entre otros, en esta misma línea las narrativas cinematográficas emergen particularmente como un recurso didáctico como lo argumenta (García, 2007) en su artículo, que las narrativas cinematográficas lejos de ser únicamente un entretenimiento posee una vocación pedagógica y social, en el cual mediante el uso de estas narrativas se puede motivar, ejemplificar, incluso sustituir otros materiales, ya que estas poseen una capacidad para recrear contextos históricos, éticos y filosóficos, para así activar el pensamiento crítico y la lectura de imágenes, lo que lo convierte en una herramienta que puede atravesar cualquier disciplina y los diferentes niveles educativos. En este sentido, el uso de narrativas cinematográficas representa una convergencia ideal entre el lenguaje audiovisual y lo conceptual, permitiendo a los estudiantes conectar de manera explícita con los contenidos científicos desarrollados en el aula. Al respecto, (Rincón, 2016) señala que los medios de comunicación, especialmente el cine, ejercen una profunda influencia en el aprendizaje escolar. En su investigación, el autor concluye que la ciencia ficción y las estructuras narrativas asociadas constituyen una herramienta didáctica altamente valiosa para la enseñanza de la física. De este modo, las producciones cinematográficas dejan de ser un mero entretenimiento cuando su incorporación responde a una intencionalidad pedagógica explícita, tal como se plantea en este trabajo. Las producciones cinematográficas dejan de ser únicamente un medio de entretenimiento cuando su uso en el aula responde a una intencionalidad pedagógica explícita, como lo es en el caso de esta investigación. De acuerdo con (García, 2007) el valor didáctico del cine no radica en su proyección en sí misma, sino en la mediación docente que orienta la observación, el análisis y la reflexión sobre los contenidos presentados. En este sentido, las películas se transforman en recursos didácticos cuando se articulan con objetivos de aprendizaje concretos, se integran a estrategias de discusión, análisis crítico e interpretación, y se emplean para ejemplificar o problematizar conceptos.

Ventajas y desafíos del uso del cine en la enseñanza de la física

Para explorar el uso de la narrativa como recurso didáctico es importante adentrarse en las ventajas y desventajas que estas han presentado en la enseñanza de la ciencia, anteriormente se habló del uso de estas como recurso didáctico y ya se tiene claro de que las narrativas cinematográficas son una herramienta buena para llevar a cabo enseñanzas acerca de una temática, sin embargo, tradicionalmente se ha considerado que la ciencia y la narrativa son modos de discurso opuestos, no obstante la narrativa aparece en diversos géneros científicos, es por esto que se considera necesario centrar una buena clasificación de las narrativas que usaremos, del género de drama y ciencia ficción, por esta razón, se considera necesario establecer una clasificación adecuada de las narrativas que serán utilizadas en el aula, ya que no todas permiten una lectura clara y rigurosa de la temática a abordar. Algunas narrativas presentan ambigüedades interpretativas o niveles de complejidad que dificultan su articulación con los contenidos académicos, lo que puede afectar la precisión conceptual con la que los estudiantes comprenden los fenómenos trabajados. En el marco de esta investigación, esta dificultad se reconoce como un aspecto central a considerar al momento de seleccionar y analizar las narrativas cinematográficas.

El desafío de narrar fenómenos estudiados por la ciencia en contextos divulgativos pasa en gran medida por el problema del determinismo y la no-intencionalidad de los agentes de la naturaleza (microorganismos, animales, plantas, factores climáticos, elementos químicos, etc.), como (Koval, 2022) afirma:

> “cómo se lee en el fragmento sobre la manada de dinosaurios, parecen “programados” para hacer siempre lo mismo. Es usual que este inconveniente se resuelva mediante un mecanismo que podemos denominar “atribución de intencionalidad”, esto es, la atribución anticientífica de un cierto tipo de inteligencia humana al agente natural (p.160).

En coherencia con los autores mencionados y desde una postura propia, las escenas cinematográficas actúan como una representación visual de los conceptos de la teoría de sistemas dinámicos. Mientras lo que Lorenz describió con ecuaciones el cine lo traslada a imágenes, ambos modelos coinciden en explicar cómo la complejidad puede emerger de la simplicidad. En este sentido, la física clásica se apoya habitualmente en experimentos de laboratorio para

evidenciar la sensibilidad a las condiciones iniciales. Por su parte, la física del caos permite visualizar dicha sensibilidad mediante la evolución de trayectorias complejas.

De este modo, la narrativa cinematografica, a través de la narrativa multilineal, ofrece al estudiante un experimento mental en el que es posible observar la divergencia de trayectorias y la bifurcación de la linealidad en el espacio. Esta mediación resulta indispensable, dado que sistemas físicos caóticos emblemáticos como el problema de los tres cuerpos o el atractor de Lorenz no poseen una representación experimental sencilla que pueda reproducirse de manera directa en un laboratorio escolar.

En la práctica, el estudio de estos fenómenos depende, en gran medida, de simulaciones computacionales y modelos matemáticos basados en ecuaciones diferenciales no lineales, lo que dificulta que los estudiantes establezcan una relación inmediata entre el fenómeno físico y su representación. Al respecto, Coppo (2010) señala que el acceso a estos conceptos suele darse prioritariamente desde el formalismo matemático antes que desde la observación experimental. Esta situación incrementa la carga cognitiva y favorece que la teoría del caos sea percibida como un contenido abstracto y distante de la experiencia cotidiana.

Consecuente con la anterior idea, el laboratorio de física es fundamental para observar los distintos fenomenos de la fisica, sin embargo, presenta limitaciones críticas debido la imposibilidad de replicar condiciones iniciales idénticas. La narrativa cinematografica, en cambio, actúa como un laboratorio virtual donde la edición y control de la narrativa permite aislar la variable de interés y visualizar la divergencia de trayectorias en un tiempo manejable. De este modo, el recurso cinematográfico no reemplaza al experimento, sino que lo contextualiza conceptualmente, permitiendo que el estudiante reconozca la estructura del caos donde el ojo humano solo ve desorden. Si bien es cierto que el recurso cinematográfico corre el riesgo de instaurar una imagen distorsionada de la ciencia al escenificar universos ficticios o violar restricciones fenomenológicas elementales, es precisamente en esta ruptura de las leyes naturales donde radica su mayor potencia pedagógica al separar la narrativa de su carácter de entretenimiento, esta emerge como una simulación fenomenológica del determinismo. La capacidad del cine para repetir una escena con variaciones mínimas permite al estudiante confrontar la naturaleza de un sistema determinista, la idea de que, aunque el sistema sigue leyes fijas e invariables en las condiciones de entrada desata trayectorias divergentes, cambiando con la

noción intuitiva de predictibilidad lineal. Este fenómeno de divergencia narrativa actúa como el escenario perfecto para introducir el concepto de determinismo. Al analizar escenas donde un evento minúsculo redefine el destino de los protagonistas, pasamos de la anécdota literaria a la formalidad física, el reconocimiento de que el sistema posee una estructura causal, por esto se da paso al siguiente item, para darle una definición formal de esta estructura.

Determinismo

Para hablar de determinismo es necesario mencionar a Isaac Newton, ya que el determinismo clásico se fundamenta en sus leyes del movimiento y en la concepción mecanicista del universo. Este plantea que, si se conocen las condiciones iniciales de un sistema y las leyes que lo rigen, es posible predecir con total exactitud su estado futuro. Las leyes físicas formuladas por Newton son invariables y absolutamente deterministas, pues describen un universo ordenado, regido por causas precisas y efectos necesarios. En este marco, para Newton el universo es completamente determinista: conocer todas las leyes de la naturaleza permitiría, en principio, predecir cualquier fenómeno; (Guerrero, 2000) plantea que el determinismo clásico se fundamenta en la idea de que el universo funciona bajo leyes causales exactas y necesarias, donde cada estado de un sistema depende completamente del anterior y determina el siguiente. Inspirado en la mecánica de Newton y la formulación LaPlaciana, este modelo considera que, conociendo las condiciones iniciales y las leyes que gobiernan un fenómeno, es posible predecir con exactitud su evolución futura. Así, la naturaleza es concebida como un sistema ordenado y continuo, en el cual no existe espacio para el azar o la indeterminación. El determinismo clásico describe un mundo regido por relaciones funcionales entre causas y efectos, donde el presente es consecuencia del pasado y causa del futuro, consolidando una visión mecanicista de la realidad que sirvió de base para la ciencia moderna y para la confianza en la previsión absoluta de los fenómenos naturales.

Para continuar con el desarrollo del concepto de determinismo clásico, es necesario hablar de Pierre Simon Laplace, quien plantea el determinismo clásico, formulado a partir de la mecánica de Newton, sostiene que el universo funciona como una máquina perfectamente ordenada, regida por leyes causales exactas. Para Laplace, el azar no existe, lo que se percibe como incierto solo refleja la ignorancia humana frente a las condiciones iniciales. De esta manera, su concepción refuerza la idea de un determinismo absoluto, donde cada acontecimiento está previamente fijado por las leyes naturales y donde la previsión completa del universo es, al menos en teoría, posible,

en palabras de (Corredoira, 2001) el demonio de Laplace representa la formulación más precisa del determinismo clásico, donde la incertidumbre no se encuentra en el mundo, sino en la mente del observador. De este modo, el autor reafirma que el determinismo laplaciano constituye la base filosófica sobre la que se construyó la física clásica, sustentando la idea de un universo regido por causas necesarias y predecibles.

El formalismo matemático y el origen de la dificultad cognitiva.

Para realizar una transición hacia la complejidad se debe realizar una profunda deconstrucción de las herramientas formales que han sostenido a la ciencia. El lenguaje de la física clásica, basado en el cálculo diferencial de Newton y Laplace, opera bajo la premisa de la linealidad, un principio de superposición donde las causas y los efectos mantienen una proporcionalidad predecible, y donde los sistemas pueden ser fragmentados en variables independientes para su análisis analítico exacto, esto sustentado por autores como (Coppo, 2010). En la enseñanza de las ciencias de la naturaleza, la transición de la observación cualitativa de un fenómeno a su representación abstracta constituye uno de los mayores desafíos en el aula. De acuerdo con (Morales, 2020), la relación entre la física y la matemática no es meramente instrumental, ya que la matemática actúa como el lenguaje estructurante que permite modelar la realidad. Sin embargo, cuando este lenguaje se presenta de forma rígida o descontextualizada, surge el denominado formalismo matemático, el cual se erige como una barrera o dificultad cognitiva para los estudiantes. Al introducir ecuaciones diferenciales no lineales, el principio de superposición se desmorona, Morales también subraya que la física requiere un proceso de modelación, el cual demanda traducir un fenómeno natural como las corrientes de aire, la convección térmica o los cambios de presión a variables e interacciones cuantificables. La dificultad cognitiva se agudiza porque los currículos tradicionales suelen enseñar ambas disciplinas por separado, en consecuencia a esto, el aprendizaje de esta teoría suele asociarse a un dominio previo de herramientas matemáticas avanzadas, relegando la comprensión conceptual de los fenómenos que se intentan explicar, esta situación ha favorecido que dentro de la enseñanza de la física, predomine una visión mecanicista y determinista de los fenómenos naturales, en la que el comportamiento de los sistemas se presenta como completamente predecible a partir del conocimiento de sus condiciones iniciales. Sin embargo, numerosos sistemas presentes en la naturaleza, como los fenómenos meteorológicos, la turbulencia de los fluidos o incluso algunos procesos biológicos expuestos en el trabajo de (Morales, 2020), exhiben comportamientos no lineales cuya evolución no puede

comprenderse únicamente mediante los modelos tradicionales de la física clásica. Desde esta perspectiva, la dificultad para comprender la teoría del caos no reside exclusivamente en la complejidad de sus ecuaciones, sino también en el cambio conceptual que exige entenderla. Como señala (Coppo, 2010) el surgimiento de la teoría del caos implicó una transformación en la filosofía de la ciencia al cuestionar la idea de un universo completamente ordenado y predecible, proponiendo en su lugar una comprensión basada en sistemas complejos, sensibles a las condiciones iniciales y limitados en su capacidad de predicción a largo plazo. En este sentido, el obstáculo no es únicamente matemático, sino también epistemológico, pues requiere abandonar concepciones lineales profundamente arraigadas en la formación científica. Para comprender el origen de la ruptura clásica intuitiva descrita anteriormente, hay que examinar cómo el paradigma de la complejidad subyace de la noción clásica de las condiciones iniciales.

Condiciones iniciales

El concepto de condiciones iniciales resulta fundamental para comprender la evolución del pensamiento determinista y su relación con la teoría del caos. En el determinismo clásico, autores como (Corredoira, 2001) y (Guerrero, 2000) señalan basándose en la visión clásica que, si se conocen con precisión las leyes naturales y las condiciones iniciales de un sistema, es posible predecir con exactitud su comportamiento futuro, pues cada estado está completamente determinado por el anterior. Sin embargo, esta visión cambia con la aparición de los sistemas no lineales y la teoría del caos, donde, como explica también (Arango, 2019) pequeñas variaciones en esas mismas condiciones iniciales pueden producir resultados totalmente diferentes, haciendo que la predicción se vuelva imposible en la práctica. De este modo, las condiciones iniciales se convierten en el punto de transición entre el determinismo Laplaciano, que presupone un orden absoluto del universo, y la complejidad caótica, que revela los límites del conocimiento y la sensibilidad extrema de los sistemas naturales. En conclusión, por sensibilidad a las condiciones iniciales se entiende aquella propiedad de los sistemas no lineales según la cual dos estados iniciales prácticamente idénticos, evolucionan en el tiempo hacia trayectorias completamente distintas y divergentes. En la física cotidiana estamos acostumbrados a que pequeñas variaciones en la causa generen pequeñas variaciones en el efecto; sin embargo, en un sistema caótico, las interacciones no lineales amplifican esas diferencias de forma exponencial. Desde una perspectiva pedagógica, esto significa que el sistema sigue siendo estrictamente determinista,

pero se vuelve fundamentalmente impredecible a largo plazo, ya que requeriría una precisión infinita en la medición inicial para poder conocer su futuro.

Orígenes y fundamentos de la teoría del caos

Para definir el caos es importante empezar desde el significado de la palabra, se define al caos como una situación de desorden y confusión, según (Smith, 2007) el caos es considerado un concepto matemático porque surge del estudio formal de sistemas dinámicos no lineales, los cuales se describen mediante ecuaciones matemáticas deterministas. Por lo que la teoría del caos sería una teoría matemática, para explorar esta teoría debemos remontarnos a sus inicios. Como nos dice (González, 2009) Edward Lorenz es considerado el padre de la teoría del caos, sin embargo, antes de él, Henri Poincaré a finales del siglo XIX estudiando el problema de los tres cuerpos descubrió que no era posible predecir el movimiento a largo plazo de un sistema físico, esto nos dice que Henri Poincaré fue uno de los pioneros en identificar el comportamiento caótico en sistemas mecánicos al demostrar la inexistencia de una solución analítica exacta para el problema de los tres cuerpos. Sus hallazgos evidenciaron que, a pesar de estar regido por las leyes deterministas de Newton, un sistema no lineal puede presentar una dinámica extremadamente compleja e impredecible.

Años más tarde, en 1963, el meteorólogo y matemático Edward Lorenz dio un paso decisivo hacia la teoría del caos moderna. Mientras trabajaba en un modelo computacional simplificado de la atmósfera, Lorenz introdujo valores numéricos con ligeras variaciones de precisión, descubriendo que el sistema divergía drásticamente del estado de referencia. De este modo, demostró que diferencias infinitesimales en las condiciones iniciales producen resultados completamente disímiles en el tiempo, fenómeno conocido popularmente como efecto mariposa.

En coherencia con la epistemología de la física moderna, la teoría del caos se consolida como marco teórico al poseer un cuerpo formal de ecuaciones matemáticas, criterios de validación empírica y una capacidad predictiva acotada. A diferencia del determinismo mecanicista lineal donde la predictibilidad es ilimitada a largo plazo, en los sistemas caóticos el determinismo garantiza que el estado futuro esté fijado por sus ecuaciones, pero la sensibilidad a las condiciones iniciales limita la predicción cuantitativa a horizontes temporales reducidos. No obstante, la teoría conserva una alta capacidad de predicción cualitativa y estructural, al permitir describir la geometría del espacio de fases en los que evoluciona el sistema.

Es fundamental diferenciar la teoría del caos del determinismo lineal de raíz Newtoneana. Mientras que el determinismo clásico sostiene que la predictibilidad de un sistema es proporcional a la precisión de sus datos iniciales asumiendo que una pequeña incertidumbre en el presente solo genera una pequeña desviación en el futuro, la teoría del caos demuestra una ruptura epistemológica en los sistemas dinámicos no lineales, la sensibilidad a las condiciones iniciales lo que provoca una divergencia exponencial de las trayectorias. Por lo tanto, el caos no es ausencia de leyes ni azar es un determinismo no lineal donde el sistema, aunque está regido por ecuaciones perfectamente definidas y carece de componentes aleatorios, posee un horizonte de predictibilidad finito. Por lo tanto, el caos no es ausencia de leyes ni azar absoluto; se trata de un determinismo no lineal en el que el sistema, aunque está regido por ecuaciones perfectamente definidas y carece de componentes aleatorios, posee un horizonte de predictibilidad finito. Esta ruptura epistemológica demuestra que conocer las leyes fundamentales de un sistema no garantiza el control ni la previsión de su estado futuro cuando existen pequeñas fluctuaciones en las condiciones iniciales.

Es precisamente esta naturaleza del caos la que permite establecer un puente analógico con las narrativas cinematográficas de estructura no lineal. Al igual que en un sistema dinámico, el guion establece las leyes deterministas que rigen el universo de la historia; sin embargo, pequeñas variaciones en las decisiones de los personajes o en eventos aparentemente insignificantes en el origen desencadenan desenlaces drásticamente divergentes.

De esta manera, el cine deja de ser un simple recurso ilustrativo y se constituye en un laboratorio mental y visual. A través de la metáfora narrativa, el estudiante puede visualizar la bifurcación de trayectorias y la imposibilidad del control determinista, experimentando de forma intuitiva conceptos de la física no lineal que, de otro modo, quedarían restringidos al formalismo matemático abstracto.

La metáfora del efecto mariposa y su interpretación

El efecto mariposa planteado por Lorentz es una metáfora que muestra que en los sistemas lineales pequeñas variaciones en las condiciones iniciales, pueden producir grandes consecuencias, como lo plantean (John P. Briggs y F. David Peat, 2001) que Lorentz comprobó en sus modelos meteorológicos que un cambio mínimo en los datos provocaba resultados completamente distintos, este fenómeno se convertiría en un símbolo para describir la

sensibilidad de los sistemas caóticos y la imposibilidad de predecir completamente su evolución, también los autores plantean que la metáfora del caos se extiende hacia lo humano y lo social. En los fenómenos naturales y en la vida cotidiana, el caos demuestra que todo está interconectado y que las pequeñas acciones individuales pueden amplificarse y tener efectos significativos en el conjunto. Así, el poder elegir no radica únicamente en la fuerza o el control, sino también en la influencia sutil que cada persona ejerce a través de sus actos y su autenticidad, una perfecta metáfora para describir y realizar una conexión entre los sistemas deterministas y sistemas caóticos, para así llevar esta al aula y que los estudiantes interpreten la metáfora en donde cada acción, palabra o pensamiento influye en el todo y claro así, asociarlo con la ciencia. De igual manera, (Oro, 2023) señala que la metáfora del efecto mariposa encuentra su representación geométrica en el atractor de Lorenz. Este atractor corresponde a una estructura en el espacio de fases hacia la cual convergen las trayectorias del sistema; aunque la forma global del atractor es delimitada, las trayectorias individuales dentro de él son aperiodicas, nunca se repiten y muestran una extrema sensibilidad a las condiciones iniciales. Por esta razón, el atractor se convierte en un recurso gráfico ideal para que los estudiantes visibilicen, mediante representaciones o dibujos, la naturaleza no lineal de los fenómenos naturales.

Siguiendo esta línea, el efecto mariposa funciona como una metáfora científica que no describe un fenómeno físico de manera literal, sino que representa simbólicamente la propiedad matemática de la sensibilidad a las condiciones iniciales. En este sentido, Edward Lorenz utilizó originalmente esta figura narrativa para comunicar un resultado técnico complejo a un público no especializado. Así, en la didáctica de la física, la metáfora actúa como un puente cognitivo que permite al estudiante acceder a la manifestación fenomenológica del caos, facilitando la transición desde la intuición hacia la comprensión del concepto.

En la física, la metáfora es el recurso didáctico, pero el objetivo de esta es el uso de la misma como la manifestación fenomenológica de la sensibilidad de las condiciones iniciales y como se puede utilizar como puente cognitivo para que el estudiante acceda al fenómeno y finalmente comprenda el concepto, logrando entender que el caos determinista no es ausencia de orden, sino una complejidad estructural donde el sistema sigue leyes precisas pero su evolución a largo plazo es intrínsecamente impredecible debido a la naturaleza no lineal de sus interacciones, por esto es que el efecto mariposa ocurre dentro de límites. El sistema no se va al infinito ni se desordena

totalmente; se confina en una región del espacio donde hay un orden detrás del aparente desorden.

Sistemas dinámicos

La noción de sistema dinámico surge como una forma de comprender los procesos naturales desde la interacción continua entre variables que evolucionan en el tiempo. Desde la física clásica, los sistemas se han concebido como estructuras ordenadas, gobernadas por leyes causales exactas, donde el conocimiento de las condiciones iniciales permitiría predecir con total precisión su estado futuro, como lo descrito en los ítems anteriormente, este modelo era enteramente determinista clásico. En esta línea, (Guerrero, 2000) explica que los modelos físicos representan trayectorias dentro de un espacio de estados, en el cual cada punto describe una situación posible del sistema. Si las leyes que lo gobiernan son conocidas, el comportamiento futuro puede deducirse de manera exacta como lo planteaba Laplace, lo que constituye la esencia del determinismo clásico. Así, la física newtoniana configuró una visión del universo como una maquinaria perfectamente predecible, donde el cambio no es aleatorio sino consecuencia directa de causas previamente establecidas. Tiempo después, el desarrollo de la matemática moderna y la física del siglo XX reveló que incluso los sistemas regidos por leyes deterministas podían tener comportamientos impredecibles. Tal como señala (Corredoira, 2001), el descubrimiento del caos no implica la negación del determinismo, sino el reconocimiento de su complejidad. Los sistemas dinámicos pueden ser en base deterministas, es decir, obedecer leyes precisas, pero impredecibles, ya que cualquier mínima variación en las condiciones iniciales puede alterar por completo la evolución del sistema como se planteó en los ítems anteriores. Esta distinción entre determinismo y predictibilidad marca un punto de inflexión en la comprensión de la naturaleza: el orden no desaparece, pero se vuelve sensible y no lineal. A partir de estas ideas, (Arango, 2019) propone que, estos sistemas no tienden al equilibrio estático, sino que se transforman constantemente a través de bifurcaciones, en las que pequeñas perturbaciones pueden conducir a nuevas formas de orden. Este principio conecta la física con otras áreas del conocimiento, como la biología, la sociología o la educación, en tanto todos los sistemas naturales y humanos presentan un comportamiento dinámico, donde el cambio y la incertidumbre son condiciones inherentes. De esta manera, los sistemas dinámicos no se entienden como estructuras cerradas, sino como procesos evolutivos donde el orden y el caos coexisten de forma complementaria.

Para abordar el alcance de esta investigación, es preciso clarificar la postura conceptual sobre los términos fundamentales que sustentan el marco teórico. En primer lugar, se entiende por sistemas dinámicos no lineales aquellos sistemas físicos cuya evolución temporal está determinada por ecuaciones de estado donde la causa y el efecto no guardan una relación de proporcionalidad directa. En un sistema no lineal existen términos de interacción o acoplamiento cruzado que provocan que variaciones infinitesimales en las variables de entrada generen comportamientos cualitativamente distintos y desproporcionados en la salida.

En este marco se sitúa el concepto de determinismo no lineal, el cual define a aquellos sistemas que, aun estando totalmente gobernados por leyes físicas bien definidas y ecuaciones diferenciales exentas de términos aleatorios, que exhiben un comportamiento aperiódico e impredecible a largo plazo. A diferencia del determinismo mecanicista o laplaciano que asumía que conocer las condiciones iniciales permitía predecir el futuro de forma indefinida, el determinismo no lineal reconoce que la sensibilidad extrema a las condiciones iniciales impone un horizonte de predictibilidad finito, haciendo que la precisión analítica sea rebasada por la divergencia exponencial de las trayectorias en el espacio de fases.

Formalización matemática de los sistemas caóticos a partir de un sistema meteorológico.

Aunque el propósito de esta investigación no consiste en desarrollar rigurosamente la formalización matemática del caos, resulta pertinente reconocer que los fenómenos abordados mediante las narrativas cinematográficas poseen un sustento formal dentro de la física y las matemáticas. En este sentido, la aproximación a realizar a continuación está basada en el trabajo de (Morales, 2020) donde la autora plantea que los fenómenos naturales de carácter no lineal pueden comprenderse mediante modelos matemáticos que representan la interacción simultánea de múltiples variables, sin que ello implique que dichas expresiones permitan una predicción exacta de su evolución.

Basándose en la caracterización matemática de la autora, el sistema hidrodinámico y térmico de la atmósfera presentado en su tesis no cumple con las propiedades de la dinámica lineal, esto debido a que se expone una carencia de proporcionalidad para este sistema, donde se explica que una pequeña variación en las condiciones iniciales de la temperatura o presión no produce un efecto proporcional, sino cambios drásticos y erráticos en el estado posterior. Matemáticamente,

si la evolución del sistema se define por una función $f(x)$, no se cumple que $f(\alpha x) = \alpha f(x)$
La autora conecta la dinámica atmosférica del fenómeno de "El Niño" como las variaciones en la célula de Walker y los vientos alisios con los procesos de convección térmica analizados por Edward Lorenz.

A partir de las ecuaciones en derivadas parciales de Saltzman para un fluido en un espacio tridimensional y así mediante aproximaciones y simplificaciones llegar al sistema planteado por Lorentz.

Para comprender el origen histórico del determinismo no lineal, es preciso recurrir al modelo hidrodinámico desarrollado por Barry Saltzman en 1962, quien estudió la convección térmica en una capa fluida bidimensional calentada por abajo. Las ecuaciones diferenciales parciales que rigen esta dinámica expresan la conservación del momento y de la energía

Ecuaciones de Saltzman

$$\frac{\partial}{\partial t}\nabla^2\psi = -\frac{\partial(\psi, \nabla^2\psi)}{\partial(x,z)} + \nu\nabla^4\psi + g\epsilon\frac{\partial\theta}{\partial x}$$

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = -\frac{\partial(\psi,\theta)}{\partial(x,z)} + \frac{\Delta T}{H}\frac{\partial\psi}{\partial x} + \kappa\nabla^2\theta$$

En este modelo continuo, las variables representan fenómenos físicos concretos del fluido en movimiento:

$\psi(x,z,t)$ es la función de corriente y describe la velocidad del flujo de aire o fluido en la celda convectiva.

$\theta(x,z,t)$ es la desviación de temperatura que mide la variación local de temperatura respecto a la distribución lineal en estado de reposo.

ν es la viscosidad cinemática y κ difusividad térmica, que representan los efectos disipativos de amortiguamiento y conducción de calor.

Por último g, ϵ, $\frac{\Delta T}{H}$, Corresponden a la aceleración de la gravedad, el coeficiente de expansión térmica y el gradiente de temperatura aplicado.

Esto mismo explicado en el trabajo de Morales donde cita a Saltzman.

(Morales, 2020) en su trabajo explica cómo, mediante simplificaciones mecánicas y series de Fourier, se reduce al Sistema de Lorenz el cual rige las variables adimensionales de estado (X, Y, Z):

Atractor de Lorenz

$$\dot{X} = -\sigma X + \sigma Y$$
$$\dot{Y} = -XZ + rX - Y$$
$$\dot{Z} = XY - bZ$$

En este sistema simplificado conocido como el Atractor de Lorenz, las variables pierden su escala espacial continua, pero conservan un significado físico fundamental en el bucle de convección:

Para este sistema la autora plantea el siguiente significado, donde X, Y, Z, son las variables dependientes y σ, r, b son parámetros constantes del medio, número de Prandtl, número de Rayleigh y constante de proporcionalidad geométrica.

En síntesis, el tránsito desde las ecuaciones de conservación hidrodinámicas de Saltzman hasta el sistema simplificado de Lorenz representa un hito fundamental en la descripción de la dinámica atmosférica y los fluidos geofísicos. A diferencia de los modelos atmosféricos lineales previos que asumían que pequeñas perturbaciones en las variables de estado producían respuestas proporcionales y fácilmente predecibles en el tiempo, las ecuaciones de Lorenz demuestran que las fluctuaciones en los gradientes de temperatura y la velocidad de circulación del fluido poseen una naturaleza inherentemente no lineal.

Esta no linealidad se evidencia directamente en la estructura matemática del sistema a través de los términos de acoplamiento cruzado $-XZ$ y XY. En la segunda ecuación ($\dot{Y} = -XZ + rX - Y$), el producto $-XZ$ representa cómo la variación vertical de temperatura (Z) interactúa con la circulación (X) para modificar el contraste térmico horizontal (Y). Asimismo, en la tercera ecuación ($\dot{Z} = XY - bZ$), el término XY expresa cómo el transporte de calor vertical se alimenta de la interacción entre la velocidad y la diferencia de temperatura horizontal. La presencia de estas variables quiebra el principio de superposición lineal, haciendo que el sistema abandone el comportamiento predecible y se comporte como un mecanismo complejo de carácter aperiódico.

En consecuencia, para caracterizar la evolución temporal de estas perturbaciones y cuantificar la velocidad con la que el sistema pierde predictibilidad, se hace indispensable abandonar las

herramientas analíticas tradicionales y trasladar el análisis hacia el espacio de fases, donde la sensibilidad a las condiciones iniciales puede ser estudiada mediante herramientas como las secciones de Poincaré.

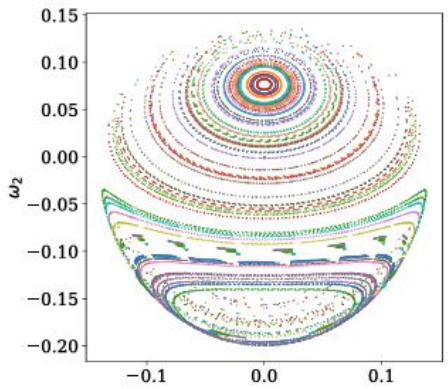
Secciones y mapeo de Poincaré

Uno de los mayores aportes de Henri Poincaré al estudio de los sistemas dinámicos fue el desarrollo de métodos cualitativos que permitieran comprender el comportamiento de un sistema sin necesidad de resolver de manera exacta sus ecuaciones diferenciales. Entre estas herramientas destacan las secciones de Poincaré, las cuales constituyen uno de los recursos más importantes para identificar la transición entre movimientos periódicos y comportamientos caóticos. Autores como (Martin, 2023) y (Nuñez & Brito, 2013) entienden como Poincaré comprendió que la clave no residía en hallar soluciones cuantitativas exactas, sino en interpretar el comportamiento cualitativo y geométrico de las trayectorias en el espacio de fases. Bajo este nuevo enfoque, introdujo herramientas revolucionarias como la teoría cualitativa de ecuaciones diferenciales, el concepto de ciclos límite y los mapas o secciones de Poincaré. En su tesis los autores definen cómo en un sistema dinámico continúo definido en un espacio de fases de dimensión n, la visualización de las trayectorias temporales puede volverse sumamente compleja a medida que aumenta la dimensionalidad del sistema. Para simplificar este análisis sin perder la esencia de la dinámica global, la sección de Poincaré se define como una superficie transversal, digamos Σ, de dimensión $n - 1$, que interseca el flujo de manera limpia y no paralela. Es decir, las huellas dejadas por las trayectorias del sistema sobre esta superficie transversal reciben el nombre de sección de Poincaré, mientras que la relación entre un punto de intersección y el siguiente constituye el denominado mapa de Poincaré, el cual conserva muchas de las propiedades dinámicas del sistema original, pero en una dimensión menor.

A partir de esta superficie se construye el mapeo de Poincaré, que actúa como un sistema dinámico discreto gobernado por una función que proyecta un punto de cruce con su sucesor inmediato, este mapeo reduce en una unidad la dimensionalidad del espacio de estados original, facilitando la visualización y heredando propiedades matemáticas clave del flujo continuo, tales como la estabilidad de las órbitas y la existencia de caos determinista, como se observa en la figura 1, las secciones de Poincaré permiten distinguir regiones de comportamiento regular, representadas por curvas cerradas, y regiones caóticas, caracterizadas por una distribución

aparentemente aleatoria de puntos, lo que evidencia la sensibilidad del sistema frente a pequeñas variaciones en las condiciones iniciales como expone en su tesis el autor (Sierra, 2023).

Figura 1 Sección de Poincaré para el péndulo doble.



Tomado de Secciones de Poincaré: delatando el caos en el péndulo doble, por D. A. Sierra Zamora, 2023, Paskín Matemático, pag 8.

La sección de Poincaré representada en la Figura 1 constituye un corte transversal bidimensional en el espacio de fases del péndulo doble, el cual permite visualizar la transición entre regímenes periódicos y caóticos.

Donde en el eje vertical ω_2 es la velocidad angular del segundo péndulo

Y por el eje horizontal corresponde a la posición angular (θ_2) o al ángulo del segundo péndulo en el momento en que el sistema cruza un plano de sección transversal predeterminado en el espacio de fases.

Una de las mayores virtudes de las secciones de Poincaré es su capacidad para delatar de forma inmediata la naturaleza del movimiento del sistema bajo estudio. Dependiendo de la estructura que adopten los puntos proyectados en la sección transversal, lo expuesto por (Sierra, 2023) quien señala que el objetivo de los mapas de Poincaré no consiste en obtener soluciones analíticas de sistemas no lineales, sino en estudiar cualitativamente su evolución temporal. En el caso particular del péndulo doble, sistema ampliamente reconocido por su comportamiento caótico, el autor de este texto muestra que las secciones de Poincaré permiten evidenciar el cambio entre movimientos caóticos, haciendo visible una dinámica que resulta difícil de interpretar únicamente mediante las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. Es por esto que, desde una perspectiva didáctica, las secciones de Poincaré adquieren especial relevancia porque convierten un fenómeno matemáticamente complejo en una representación gráfica accesible para el

estudiante. En lugar de centrar la atención en el desarrollo analítico de ecuaciones no lineales, el estudiante puede interpretar visualmente cómo pequeñas diferencias en las condiciones iniciales producen configuraciones completamente distintas en el espacio de fases.

Para ilustrar cómo este mapa mejora la comprensión del sistema sin recurrir al desarrollo analítico de ecuaciones diferenciales, se puede analizar el comportamiento cualitativo del péndulo doble. Suponiendo que que se registra una fotografía instantánea del estado del sistema únicamente en los momentos en que el primer brazo del péndulo cruza la posición vertical hacia abajo. En ese instante exacto, la sección de Poincaré grafica dos variables del segundo brazo: su posición angular en el eje horizontal y su velocidad angular en el eje vertical.

Cuando el péndulo se libera desde ángulos pequeños, el sistema opera en un régimen de baja energía caracterizado por un movimiento regular y predecible. En este escenario, cada vez que el primer brazo atraviesa la vertical, el segundo brazo conserva una posición y una velocidad casi idénticas a las registradas en el ciclo anterior. Al proyectar estas capturas sucesivas sobre el mapa de Poincaré, los puntos generados no se distribuyen al azar, sino que se alinean continuamente hasta trazar una curva cerrada o elipse suave. Para el estudiante, la presencia de estas trayectorias continuas constituye la evidencia gráfica del orden determinista y de la conservación de la predictibilidad a largo plazo.

Por el contrario, si se incrementa la energía inicial liberando el péndulo desde una altura mayor, el sistema experimenta una transición hacia el régimen caótico donde el movimiento se vuelve aperiódico y los brazos comienzan a dar giros completos de forma errática. Al aplicar el mismo corte estroboscópico, la velocidad y la posición del segundo brazo varían drásticamente en cada paso por la vertical. Como resultado gráfico en la sección de Poincaré, las curvas cerradas y estructuradas se rompen por completo, dando paso a puntos aislados que llenan una región del plano. De este modo, la sección de Poincaré transforma la interpretación de la teoría del caos en un ejercicio de lectura cualitativa. El estudiante no requiere integrar matricialmente el sistema ni calcular para diagnosticar la dinámica.

Péndulo doble como sistema físico.

El péndulo doble se constituye como un sistema físico emblemático para el estudio de la teoría del caos, ya que está regido por ecuaciones diferenciales deterministas y, sin embargo, exhibe una

notable sensibilidad a las condiciones iniciales que limita su predictibilidad a largo plazo como se vio en el apartado anterior. Esta dinámica no lineal y su transición hacia el caos se evidencian de manera directa mediante las secciones de Poincaré, las cuales actúan como un mapa geométrico que registra los cambios de régimen del sistema a medida que varía su energía total.

La diferenciación entre un comportamiento periódico y uno caótico en la sección de Poincaré se manifiesta a través de la morfología que adoptan los puntos de corte registrados en el plano. En regímenes de baja energía, donde predomina el movimiento regular, las trayectorias del péndulo doble se encuentran confinadas en invariancia en el espacio de fases. La representación gráfica muestra contornos continuos, cerrados y bien definidos. Si el sistema es puramente periódico, el mapa exhibe un número finito de puntos fijos a los que la trayectoria regresa de forma recurrente, los puntos se van depositando consecutivamente hasta dibujar una curva cerrada suave.

A medida que se incrementa la energía del sistema, tiene lugar un proceso de bifurcación donde el comportamiento determinista lineal colapsa. En la sección de Poincaré, este cambio de régimen no ocurre de forma instantánea, sino mediante la deformación y posterior destrucción gradual de las curvas cerradas. Las órbitas estables comienzan a dividirse en islas de periodicidad secundaria rodeadas por zonas de inestabilidad. Al superar el umbral crítico de energía, estas estructuras continuas se rompen por completo, provocando que los puntos de intersección dejen de formar líneas y se dispersen de manera aperiódica y aparentemente aleatoria sobre el plano. Esta transición visual de contornos geométricos definidos a una masa de puntos que llena una región del plano que representa la firma topológica de la pérdida de predictibilidad y la emergencia del caos determinista descrita por (Sierra, 2023), no obstante autores como (Martin, 2023) señala que la abstracción matemática propia de la teoría del caos dificulta su comprensión cuando se aborda únicamente desde un enfoque formal. Según el autor el péndulo doble presenta un desarrollo de conceptos como imprevisibilidad, bifurcación y sensibilidad a las condiciones iniciales. Lo cual presenta al péndulo doble como un sistema físico adecuado para la enseñanza de la teoría del caos, en este sentido, el péndulo doble se consolida como un modelo físico fundamental para comprender cómo sistemas simples en su formulación pueden exhibir dinámicas complejas e imprevisibles. Para continuar esta idea, autores como (Satos, Simarro, & fuertes, 2019) postulan a la teoría del caos como un campo de la física que estudia sistemas dinámicos deterministas cuyo comportamiento resulta impredecible debido a su extrema sensibilidad a las condiciones iniciales.

Los autores enfatizan que el caos no implica ausencia de leyes, sino que surge de la no linealidad de las ecuaciones que describen el sistema.

En este contexto sirve para realizar una conexión en que tradicionalmente el estudio de los sistemas dinámicos en el aula de física se ha centrado en fenómenos mecánicos tangibles, siendo el péndulo doble el referente para ilustrar el caos determinista. En este sistema, la interacción de sus componentes genera una respuesta altamente no lineal donde variaciones en el ángulo inicial de liberación producen trayectorias que divergen en el espacio. No obstante, el péndulo físico presenta limitaciones didácticas, cómo la irreversibilidad de sus trayectorias y la dificultad de aislar la sensibilidad inicial de la fricción y demás variables.

Bajo este argumento, se propone que las narrativas cinematográficas seleccionadas en los siguientes apartados no actúan como meras ilustraciones, sino como representaciones visuales del péndulo doble. Mientras que el péndulo muestra la sensibilidad inicial en el espacio físico, películas como *El efecto mariposa* (Bress & Gruber, 2004) y *Mr. Nobody* (Dormael, 2009) permiten congelar y reiniciar el sistema, ofreciendo un laboratorio de control donde la edición narrativa simula la evolución de múltiples órbitas partiendo de una misma vecindad. Así, la escena en la que Evan altera su pasado o Nemo enfrenta una decisión crucial en la estación de tren, se analiza aquí como la manifestación fenomenológica de una bifurcación análoga al comportamiento transitorio de un péndulo doble ante un cambio en su parámetro de energía, El estado del sistema se define en un espacio de fases de 4 dimensiones $(\theta_1, \theta_2, p_1, p_2)$. Una trayectoria es una curva continua y determinista en este espacio.

El cine como medio de representación de conceptos científicos

Tanto el texto de (Petit y Solbes, 2023) como el de (Rincón, 2016) coinciden en que las narrativas de ciencia ficción constituyen una herramienta eficaz para la enseñanza de las ciencias, ya que permiten conectar los contenidos conceptuales con el contexto cultural y cotidiano del estudiante. De manera general, los autores sostienen que las películas y relatos de este género pueden servir como recursos mediadores del aprendizaje, promoviendo la argumentación, la reflexión crítica y la reconstrucción de concepciones alternativas. En este sentido, la ciencia ficción posibilita un aprendizaje significativo y contextualizado, ya que sitúa los conceptos científicos en escenarios imaginarios que estimulan la curiosidad y el análisis de su aceptación. Además, al incluir representaciones distorsionadas de la ciencia o de los científicos, el docente puede aprovechar

estos errores para generar discusión y construir una comprensión más realista de la ciencia en el aula. Así, el uso del cine y de la narrativa audiovisual no solo facilita la comprensión de fenómenos físicos o naturales, sino que también favorece la formación de una actitud crítica hacia la ciencia y su papel social.

Análisis de películas que abordan el efecto mariposa y el caos.

En esta sección se hará el análisis detallado de cada película para lograr seleccionar escenas presentes en estas y llevarlas al aula para una correcta utilización de este recurso didáctico, este análisis estará centrado en dos películas en específico *The Butterfly Effect* (Bress & Gruber, 2004) y *Mr. Nobody* (Dormael, 2009)

Análisis de la película *El efecto mariposa [The Butterfly Effect]* (Bress & Gruber, 2004)

La película *El efecto mariposa [The Butterfly Effect]* (Bress & Gruber, 2004) ,constituye una representación simbólica y narrativa de la teoría del caos, en especial del principio de sensibilidad a las condiciones iniciales. La trama sigue la vida de Evan Treborn, un joven que posee la capacidad de viajar mentalmente a momentos específicos de su pasado y alterar los acontecimientos. Cada cambio que realiza, por pequeño que sea, transforma radicalmente su presente, provocando efectos impredecibles y muchas veces trágicos. Esta estructura narrativa refleja con precisión el comportamiento de un sistema dinámico no lineal, donde mínimas variaciones iniciales generan resultados completamente distintos, tal como lo plantea Edward Lorenz en el efecto mariposa. Desde una lectura conceptual, la película puede entenderse como una distinción al determinismo clásico formulado por Newton y Laplace, el cual asumía que, conociendo las condiciones iniciales de un sistema, era posible predecir con exactitud su evolución. *El efecto mariposa [The Butterfly Effect]* (Bress & Gruber, 2004) contradice esta visión al mostrar que incluso en un universo regido por leyes causales, el conocimiento limitado del sistema impide prever todas las consecuencias. Como afirma (Corredoira, 2001) el caos no niega el determinismo, sino que revela sus límites epistemológicos. En este sentido, la narrativa de la película permite comprender que la imposibilidad de controlar el futuro no radica en la ausencia de leyes, sino en la complejidad de la causalidad.

Desde el punto de vista didáctico, esta película se ofrece como un recurso valioso para trabajar con los estudiantes la noción de determinismo y teoría del caos, así como la relación entre

determinismo, azar y probabilidad. A través de su análisis, los estudiantes pueden reconocer que los sistemas físicos y sociales no son predecibles de manera absoluta, y que pequeñas acciones o decisiones pueden tener consecuencias amplificadas en el tiempo. De esta manera la película *El efecto mariposa [The Butterfly Effect]* (Bress & Gruber, 2004) permite introducir el concepto de sistemas caóticos deterministas de forma narrativa y accesible, propiciando reflexiones que conectan la ciencia con la experiencia humana y las implicaciones éticas del cambio y la decisión, la narrativa del efecto mariposa puede ubicarse dentro de un sistema físico cuando se utiliza como un recurso interpretativo que traduce la sensibilidad a las condiciones iniciales, en una secuencia comprensible de eventos. De este modo, la metáfora narrativa no describe el sistema en sentido literal, sino que acompaña su dinámica física, permitiendo representar de manera intuitiva la evolución y la imprevisibilidad de un sistema.

Por último, en la tabla 1 se realiza una síntesis de la película y qué relación presenta con la teoría del caos.

Tabla 1 Síntesis de la película The Butterfly Effect (Bress & Gruber, 2004)

Titulo	**Género**	**Sinopsis**	**Relación con el efecto mariposa y sistemas dinámicos**
The Butterfly Effect (El efecto mariposa)	Ciencia ficción, drama, thriller	Evan Treborn es un joven que sufre frecuentes lagunas mentales durante su infancia y adolescencia, estas lagunas Evan las anotaba en su diario. Años después descubre que esas ausencias le permiten regresar al pasado y alterar lo que ocurrió en esos momentos de lagunas mentales anotadas previamente en su diario. Con esta habilidad, intenta cambiar sucesos dolorosos que ocurrieron para mejorar la vida de quienes lo rodean.	Evan intenta cambiar su pasado y cada mínima modificación genera futuros completamente distintos, haciendo así analogía del efecto mariposa, para de esta manera evidenciar lo frágil que es la causalidad y los sistemas deterministas, reflejando la idea de que un pequeño cambio en las condiciones iniciales puede

		Una de las personas más importantes en su historia es Kayleigh, su amiga de la infancia y su gran amor. Desde pequeños comparten experiencias traumáticas, marcadas por el abuso de su padre. Evan enfrenta el dilema de intervenir o no en esas situaciones, pues sabe que cualquier decisión puede cambiar drásticamente su futuro y el de Kayleigh: salvarla puede significar perderla en otras circunstancias, mientras que no hacer nada la condena a una vida marcada por el dolor. Su otro gran vínculo es Lenny, su mejor amigo de la infancia, un chico tímido y vulnerable. Las decisiones de Evan también afectan profundamente la vida de Lenny. Cada vez que Evan altera un recuerdo, las vidas de Kayleigh, Lenny y él mismo se transforman. (Bress & Gruber, 2004) *Sinopsis basada en la película The Butterfly Effect, dirigida por Eric Bress y J. Mackye Gruber, 2004.*	generar enormes variaciones en el resultado final.

Análisis de la película *Mr. Nobody* (Dormael, 2009)

Dirigida por (Dormael, 2009) *Mr. Nobody* profundiza en la relación entre tiempo, causalidad y elección, abordando de manera poética la multiplicidad de futuros posibles a partir de un solo instante decisivo, es decir, que en esta se puede representar de manera visual las bifurcaciones generadas a partir de la no linealidad y las condiciones iniciales decididas por el protagonista. Es decir que esta narrativa se presenta como un recurso ideal ya que Nemo Nobody el protagonista, es un hombre que recuerda simultáneamente todas las vidas que pudo haber vivido, cada una derivada de una decisión distinta en su infancia. Esta estructura fragmentada y no lineal convierte a la película en una metáfora visual del comportamiento de un sistema dinámico, donde cada elección representa una bifurcación que conduce a una nueva trayectoria. Tal como describe

(Arango, 2019) los sistemas no lineales son abiertos y sensibles, capaces de transformarse mediante pequeñas perturbaciones que originan estados completamente nuevos. Desde el punto de vista conceptual, *Mr. Nobody* (Dormael, 2009) cuestiona la idea del tiempo lineal y del universo determinista, al igual que la película *el efecto mariposa [The Butterfly Effect]* (Bress & Gruber, 2004). Si en la teoría de Laplace el conocimiento total de las condiciones iniciales permitía predecir todo el futuro, en esta película el tiempo se muestra como una red de posibilidades simultáneas e impredecibles. Cada elección abre un camino que excluye los demás, mostrando que el orden y el caos pueden coexistir dentro de una misma estructura narrativa. La película refleja la noción de sistemas complejos, aunque todos los futuros de Nemo surgen de una causa inicial planteados por su decisión, el resultado de cada trayectoria no puede anticiparse completamente, la película puede utilizarse en el aula para fomentar la reflexión sobre la no linealidad de los fenómenos naturales y la diversidad de trayectorias posibles en los sistemas físicos, esto mediante el vínculo entre las decisiones de un sujeto y las bifurcaciones presentes en los fenómenos naturales, ya que esta se establece a partir de una analogía estructural en ambos casos, un punto inicial da lugar a trayectorias divergentes con consecuencias distintas, mientras que en los sistemas físicos la bifurcación responde a leyes dinámicas no lineales, en la experiencia humana la decisión cumple una función narrativa similar, permitiendo representar de manera comprensible la sensibilidad y la irreversibilidad propias de los sistemas caóticos. Siguiendo esta idea los estudiantes pueden analizar cómo la película desafía la noción de predictibilidad absoluta de los sistemas deterministas y promueve una comprensión del universo como un conjunto de posibilidades, pero siguiendo el modelo determinista. A través de esta narrativa, es posible establecer puentes entre la física y la filosofía, invitando a los estudiantes a pensar en el caos no como desorden, sino como una forma de orden complejo que depende de múltiples factores y decisiones iniciales.

Por último, en la tabla 2 se realiza una síntesis de la película y que relación presenta con la teoría del caos.

Tabla 2 Síntesis de la película Mr. Nobody (Dormael, 2009)

Titulo	**Género**	**Sinopsis**	**Relación con el efecto mariposa y sistemas dinámicos**
Mr. Nobody	Ciencia ficción, drama	Nemo Nobody es un hombre anciano que recuerda todas las vidas posibles que pudo haber tenido. Su historia comienza cuando, de niño, se encuentra en una estación de tren, frente a la decisión crucial de irse con su madre o quedarse con su padre. Desde allí, su vida se divide en múltiples realidades posibles. En una de ellas, Nemo se va con su madre y conoce a Anna, con quien comparte un amor intenso y profundo, pero lleno de obstáculos. La decisión de confesarle o no sus sentimientos determina si llegan a estar juntos o se pierden para siempre. En otra, Nemo se queda con su padre y conoce a Elise, con quien se casa, pero el matrimonio se ve marcado por la depresión de ella y una vida emocionalmente muy dolorosa. En otro camino, conoce a Jeanne, con quien vive una vida aparentemente estable y cómoda, aunque vacía y carente de pasión. (Dormael, 2009) *Sinopsis basada en la película Mr. Nobody, dirigida por Jaco Van Dormael, 2009.*	Nemo imagina o vive las múltiples versiones de su vida dependiendo de las elecciones que tomó o no tomó, en esta película se abarca de manera filosófica la cantidad de posibilidades y caminos abiertos a elegir, demostrando y haciendo analogía a las consecuencias de como los sistemas caóticos pueden llevar a varios resultados dependiendo de las condiciones iniciales.

Escenas escogidas

Las escenas seleccionadas corresponden a la parte en que Evan se encuentra en la cárcel (*The Butterfly Effect*, 2004, 1:03:30–01:05:35) en *El efecto mariposa*, por otro lado, Nemo eligiendo entre irse con su padre o su madre (*Mr. Nobody*, 2009, 00:32:45–00:35:45) en *Mr. Nobody*; fueron escogidas por su alta carga simbólica y conceptual, ya que condensan de manera narrativa los principios fundamentales de la teoría del caos y del determinismo clásico que orientan esta investigación. Ambas representan momentos de bifurcación, es decir, puntos de decisión donde una mínima acción o elección desencadena trayectorias completamente distintas en el sistema narrativo, lo que las convierte en metáforas visuales adecuadas para evidenciar los sistemas dinámicos sensibles a las condiciones iniciales, por lo que las narrativas cinematográficas no se presentan como ficciones aisladas, sino como representaciones de trayectorias en el espacio físico, donde los giros del guion actúan como analogías de las bifurcaciones en un sistema no lineal.

En la escena de *El efecto mariposa [The Butterfly Effect]* (Bress & Gruber, 2004), Evan, experimenta en la cárcel las consecuencias imprevistas de alterar el pasado. Cada intento de corregir sus errores produce un resultado diferente, más desastroso e incontrolable que el anterior. Esta secuencia visualiza la imposibilidad de predecir con exactitud el comportamiento de un sistema complejo, incluso cuando se conocen sus leyes o se actúa intencionalmente para modificarlo. Como señalan autores como (Corredoira, 2001) y (Arango, 2019) el caos no destruye el determinismo, sino que lo revela como un proceso extremadamente sensible, donde el conocimiento de las condiciones iniciales nunca es absoluto.

Por su parte, también para la escena de *Mr. Nobody* (Dormael, 2009) en la que Nemo debe decidir si irse con su padre o con su madre constituye un punto de bifurcación narrativa que simboliza el momento inicial de todas las posibles trayectorias vitales que componen la película, de hecho, en

justo este momento inicial es que la película se bifurca en los distintos caminos que le surgen a Nemo tras decidir. Esta decisión de irse con su padre o madre, aparentemente simple, define el desarrollo de múltiples futuros alternativos, lo que refleja la idea de sistemas no lineales en los que pequeñas variaciones iniciales generan efectos amplificados. Además, la escena permite explorar la dimensión filosófica del determinismo, cuestionando la existencia de un destino único y la posibilidad de prever el curso completo de los acontecimientos. Es por esto que, en la narrativa cinematográfica, un pequeño cambio en una acción perder un tren, el lugar donde cae una gota de lluvia representa una variación infinitesimal en las condiciones iniciales del sistema y personaje. Al usar estas escenas, obligamos al estudiante a reconocer que el estado futuro del sistema está acoplado de forma no lineal a su estado presente, Aunque estas historias parecen caóticas o aleatorias, están confinadas por una narrativa. Así como el Atractor de Lorenz confina las trayectorias en una forma de mariposa sin que ninguna se cruce, la narrativa cinematográfica mantiene al sistema dentro de ciertos límites de significado, permitiendo que el estudiante entienda que caos no es desorden total, sino un orden complejo con fronteras definidas llamadas determinismo.

El proceso de construcción e interiorización del marco teórico implicó un tránsito significativo desde una concepción inicial del mundo físico basada en el determinismo clásico hacia una comprensión más compleja sustentada en la teoría del caos para dar lugar a la enseñanza de estos conceptos. Esta evolución conceptual se desarrolló como parte de la sistematización y autorreflexión de mi práctica docente en el marco del diseño de esta propuesta investigativa. A través de la planeación y del contraste epistemológico de los modelos físicos presentados, se reestructuró la transposición didáctica hacia la comprensión de los sistemas no lineales. En un primer momento, la visión predominante correspondía a un enfoque clásico, en el cual los fenómenos podían explicarse a partir de relaciones lineales de causa y efecto, donde conocer las condiciones iniciales garantizaba, al menos en teoría, la predicción del comportamiento futuro de los sistemas. Sin embargo, a medida que se profundizó en los fundamentos de los sistemas dinámicos no lineales y en conceptos como la sensibilidad a las condiciones iniciales presentes en el marco teórico, se produjo un cambio progresivo en la manera de interpretar los fenómenos físicos a medida que se escribía y se definían estos conceptos. Este proceso permitió reconocer que el determinismo no implica necesariamente, ni precisión en la predictibilidad de los sistemas, y que incluso sistemas regidos por leyes deterministas pueden presentar comportamientos

impredecibles. De este modo, el caos dejó de entenderse como desorden para transformarse en una concepción propia como una forma de orden complejo, en el que pequeñas variaciones en las condiciones iniciales del sistema pueden generar grandes transformaciones, como lo manifiesta la narrativa cinematográfica. La incorporación de las narrativas cinematográficas como herramienta de análisis también contribuyó a esta transformación conceptual, al facilitar una comprensión más intuitiva y significativa de los conceptos teóricos por medio de la visualización de escenas presentes en estas narrativas. A través de estas, fue posible articular lo abstracto con lo cotidiano, permitiendo no solo una apropiación conceptual más profunda, sino también una reflexión sobre las implicaciones del caos en la vida misma. En este sentido, la interiorización que se presentó a lo largo de la construcción del marco teórico no se limitó a la adquisición de conocimientos, sino que representó un cambio de paradigma: pasar de una visión lineal, predecible y cerrada del mundo, a una comprensión dinámica, incierta y abierta, donde el conocimiento se construye reconociendo la complejidad, la no linealidad y los límites de la predicción. En este sentido y continuando con el apartado anterior de cómo estas narrativas se pueden conectar con sistemas físicos reales como el péndulo doble a continuación, se presenta un cuadro técnico que demuestra cómo estas escenas operan bajo la misma lógica formal que los modelos físicos y la dinámica no lineal:

Tabla 3 cuadro de análisis físico

Película / Escena	**Componente físico**	**Análisis desde la dinámica no Lineal**
El Efecto Mariposa -Evan en la cárcel creándose esvásticas para alterar el presente.	No lineal e Irreversibilidad de los sistemas.	Representa la ruptura de la proporcionalidad causa y efecto. Una perturbación mínima (la herida) se amplifica reconfigurando el sistema social del protagonista de forma irreversible, al igual que un sistema caótico.

-El contraste entre una vida como universitario exitoso y otra como presidiario tras un cambio menor.	Sensibilidad a las Condiciones Iniciales	Es la representación fenomenológica de un sistema caótico regido por sensibilidad de condiciones iniciales, didácticamente sirve para discutir el horizonte de predictibilidad y el por qué conocer las leyes no permite predecir el estado final si hay una incertidumbre inicial.
Mr. Nobody -Nemo en la estación de tren: la decisión de correr tras su madre o quedarse con su padre.	Punto de bifurcación	Permite visualizar el estado de inestabilidad donde el sistema alcanza un valor crítico y la solución deja de ser única. En el aula, ayuda a entender la ruptura de simetría en sistemas dinámicos que deben elegir una rama de evolución.

Este cuadro constituye la herramienta de validación de mi propuesta, donde la narrativa deja de ser un recurso literario para convertirse en una herramienta para la visualización de la dinámica no lineal, permitiendo la formalización de conceptos que en el laboratorio convencional quedan ocultos por el difícil manejo de este fenómeno en laboratorio, componiéndose así la narrativa y el efecto mariposa como una poderosa herramienta para la enseñanza de los conceptos abstractos de la teoría del caos, este análisis demuestra que la mediación cinematográfica permite al estudiante observar una geometría caótica representada en los sistemas no lineales. Mientras que en un péndulo doble la bifurcación es un dato matemático, y en la narrativa *Mr. Nobody* la bifurcación es una experiencia fenomenológica que facilita la comprensión de cómo la incertidumbre en el punto de decisión define la evolución global del sistema.

CAPÍTULO III

Metodología

Esta investigación se enmarca en un enfoque cualitativo, el cual centra su intención en la comprensión profunda de fenómenos complejos, más que en la cuantificación de datos. Entendiendo esto **"***en, sentido amplio, pude definirse la metodología cualitativa como la investigación que produce datos descriptivos: las propias palabras de las personas, habladas o escritas, y la conducta observable"* (Quecedo & Garrido, 2002, p. 7)**.**

De igual forma esta investigación adopta el enfoque cualitativo para responder a la necesidad de comprender e interpretar las experiencias de los involucrados en esta indagación, en el contexto particular que es escolar, principalmente este enfoque es de carácter descriptivo ya que *"El interés central de este modo de investigación está en la interpretación de los significados atribuidos por los sujetos a sus acciones en una realidad socialmente construida"* (Moreira, 2002, p. 3), Para materializar este enfoque descriptivo e interpretativo en el escenario de aula, se emplearon de manera sistemática las siguientes técnicas cualitativas de recolección y análisis de información:

El análisis de contenido cualitativo: Utilizado para examinar de manera sistemática las respuestas escritas, interpretaciones y producciones elaboradas por los estudiantes durante el desarrollo de las guías de trabajo y los talleres basados en los fragmentos cinematográficos.

La observación participante: Llevada a cabo de forma directa por el docente a cargo de la investigacion a lo largo de las sesiones de clase, permitiendo registrar las interacciones, debates y debates emergentes en el aula de manera natural y contextualizada.

El cuestionario de preguntas Abiertas: Diseñado específicamente para que los estudiantes expresaran libremente y con sus propias sus ideas previas, analogías y la posterior formalización sobre la teoría del caos.

Estas técnicas se instrumentalizaron a través de herramientas concretas como el diario de campo, el registro de audio, los talleres escritos de los estudiantes, las transcripciones de las discusiones grupales y las redes de lanas, permitiendo así capturar descripcion natural del tránsito conceptual de los participantes.

Este paradigma no busca generalizar los resultados obtenidos sino ofrecer una realidad detallada atendiendo a las condiciones del contexto en las que se busca desarrollar este fenómeno. Desde esta perspectiva según (Hernández, Collado, Baptista, & Plar, 2014) el enfoque cualitativo descriptivo se centra en describir con detalle una realidad educativa acotada o las percepciones de un grupo de personas de un contexto puntual.

Como metodología central de esta investigación se adopta la que corresponde a un diseño cualitativo descriptivo, que busca caracterizar y comprender las concepciones en torno al determinismo en la física clásica sin pretender generalizar los resultados. Dentro de esta metodología se empleará la técnica de análisis de contenido, adecuada para identificar, categoriza e interpretar los significados presentes en los discursos y producciones de los estudiantes, ya que según (Bernetr, s.f) el análisis de contenido se emplea para estudiar cualquier tipo de documento que transcriba un relato, ya sea oral, escrito o icónico, pudiendo referirse tanto a acontecimientos reales como a contenidos de ficción.

Contexto y población

Para esta investigación es importante reconocer el contexto en donde se realizó la investigación, tuvo una implementación que fue aplicada en la institución Francisco primero S.S. que cuenta con un programa de inclusión, lo que implica la presencia de estudiantes con diversas formas y ritmos de aprendizaje. Este aspecto resulta particularmente valioso para la investigación, ya que permite observar cómo se construyen y expresan las concepciones sobre el determinismo clásico en un aula diversa, donde confluyen distintas perspectivas y estilos cognitivos.

En este sentido la población objeto de estudio para esta investigación serán los estudiantes de bachillerato de la sede B, quienes por su nivel académico y formativo cuentan con bases en ciencias naturales y fisica lo que los hace adecuados para abordar un tema como el determinismo en fisica clásica. La muestra se seleccionara de manera intencional con el propósito de que el grupo escogido permita obtener información significativa para el análisis cualitativo, para esto se seleccionó como unidad de análisis los estudiantes de un colegio público de Bogotá, para la población fueron seleccionados los estudiantes de educación básica secundaria y media de la sede B del Colegio Francisco Primero S.S. (IED), ubicado en la localidad de Barrios Unidos, Bogotá, y para la muestra se tomó un grupo de estudiantes del grado octavo de este colegio.

Específicamente, el grado 801 fue seleccionado para llevar a cabo esta implementación. Este curso cuenta con un grupo de 21 estudiantes, lo que resulta adecuado para el trabajo colaborativo en pequeños grupos. En cuanto a su caracterización socioeducativa, el grupo se caracteriza por una diversidad en los ritmos de aprendizaje y una dinámica participativa enfocada en el trabajo práctico en ciencias. El espacio académico asignado para esta implementación se encuentra dividido en tres sesiones diferentes, completando una intensidad horaria de cinco horas, con un tiempo máximo de dos horas por clase.

Respecto a las consideraciones éticas de la investigación, es preciso señalar que el desarrollo de esta secuencia didáctica se integró de manera orgánica en la planificación curricular y en las actividades académicas habituales del espacio escolar, constituyéndose en un estudio de investigación pedagógica de riesgo mínimo. Por esta razón, y dado que la recolección de información se enfocó exclusivamente en los procesos cognitivos y producciones académicas derivadas de las sesiones de clase, no se requirió la aplicación de un protocolo de consentimiento informado individual de intervención clínica o sensible. Las producciones escritas y gráficas analizadas se abordaron de manera global y con fines estrictamente investigativos e instruccionales.

Adicional también se realizará una pequeña implementación con fines comparativos frente a la que se considera la población principal de esta investigación (los estudiantes de bachillerato) esta implementación fue dirigida a una comunidad de indagación proveniente de la electiva dictada en la Universidad Pedagógica Nacional, la electiva tiene como nombre *Asombro e imaginación*, la actividad tuvo una duración de una hora y contó con la participación de estudiantes universitarios de diversas licenciaturas y semestres, quienes se encontraban entre cuarto y décimo semestre de sus respectivos programas de formación.

Diseño de la implementación

Para el diseño de esta implementación y considerando el contexto anteriormente descrito se diseñaron dos secuencias de actividades distintas que se centran en la enseñanza y comprensión de los sistemas caóticos, estas secuencias incorporan como recurso didáctico el uso de narrativas cinematográficas con el propósito de favorecer el desarrollo del concepto y la concepción de la teoría del caos en los estudiantes.

Para la implementación principal se optó por realizar grupos compuestos entre tres y cinco integrantes, ya que esto fortalecería el diálogo y la interacción entre los estudiantes para así promover el pensamiento crítico entre estos grupos, la ubicación de estos grupos ya se encontraba previamente conformada por los grupos de estudio realizados por el docente titular de la clase.

Para la segunda implementación (anexo 2) se optó por realizar un único grupo en el que todos los estudiantes de la comunidad de indagación participaran, para así sin importar las diferencias académicas se pudiera llevar a cabo esta comunidad de indagación en la que todos son participes.

El diseño de estas actividades se encuentra resumido de forma en la tabla 4:

Cabe recalcar que las siguientes tablas muestran el objetivo enfocado para cada actividad en las secuencias didácticas, esta estructura es tomada basándose en el autor (Barriga, 2013) , es decir que se muestra en forma de resumen, para ver a detalle cada actividad planteada ver los anexos.

Tabla 4 Resumen secuencia de actividades #1

SECUENCIA DIDÁCTICA DE ACTIVIDADES #1 (cinco horas)	
Objetivos: Propiciar la construcción de significado de los conceptos del caos, introduciendo la idea de la imprevisibilidad de los sistemas caóticos.	**Objetivos de actividades de apertura** • Identificar las ideas previas de los estudiantes frente a los conceptos del efecto mariposa y los fenómenos caóticos, para así ver la noción de estos en las narrativas cinematográficas. • Hacer uso de las narrativas cinematográficas como recurso didáctico para la construcción y la aproximación al concepto de los sistemas dinámicos y del efecto mariposa. **Objetivos de actividades de desarrollo** • Examinar como mediante un repaso histórico del surgimiento de la teoría del caos se puede llevar a cabo la construcción de los conceptos y relación de los fenómenos caóticos y el efecto mariposa, para así fortalecer y evidenciar el desarrollo de los conceptos adquiridos **Objetivos de actividades de cierre**

	• Comparar y realizar un análisis crítico acerca de los conceptos adquiridos para fomentar el pensamiento crítico y la reflexión acerca del efecto mariposa.
Actividades	**Actividades de apertura** • Visualización de las dos escenas de las narrativas cinematográficas (el *efecto mariposa y Mr. Nobody*). • Preguntas de apertura. • Realización de un mapa de decisiones basado en la sinopsis de las películas. • Visualización de las dos escenas finales de las películas. **Actividades de desarrollo** • Repaso histórico acerca del determinismo clásico vs sistemas caóticos. • Redes de lanas debidas a una condición inicial. • Entrevista por grupo. **Actividades de cierre** • Realizar un escrito con preguntas de cierre.

Tabla 5 resumen secuencia de actividades #2

SECUENCIA DIDÁCTICA DE ACTIVIDADES #2 (Una hora)	
Objetivos: Propiciar la construcción de	**Objetivos de actividades de apertura** • Reconocer a partir de estas escenas cinematográficas como el efecto mariposa se evidencia en las narrativas, generando preguntas y reflexiones que permitan iniciar una comunidad

significado de los conceptos del caos, introduciendo la idea de la imprevisibilidad de los sistemas caóticos para estudiantes de distintas licenciaturas.	de indagación sobre el efecto mariposa y su relación con la vida cotidiana y la formación profesional. **Objetivos de actividades de desarrollo** • Fomentar el uso de las narrativas como herramientas y recursos didácticos para la enseñanza del efecto mariposa en un aula distinta a la de fisica. **Objetivos de actividades de cierre** • Promover la reflexión colectiva en torno a la imprevisibilidad de los sistemas caóticos y las consecuencias de las acciones, para analizar cómo el efecto mariposa cuestiona la posibilidad de predictibilidad de los sistemas deterministas.
Actividades	**Actividades de apertura** • Visualización de las dos escenas de las narrativas. • Realizar preguntas de apertura. **Actividades de desarrollo** • Actividad red de lanas (sistema caótico). • Apertura del debate. **Actividades de cierre** • Diálogo y preguntas de cierre.

Cada una de estas secuencias de actividades se estructuró siguiendo la propuesta de (Barriga, 2013) en su documento “Guía para la elaboración de una secuencia didáctica”, para ver más detalladamente estas secuencias de actividades en los anexos 1 y 2 los encontrará.

Para añadir a esto y llevar a cabo ciertas actividades planteadas en estos objetivos el docente elaboró documentos para las actividades acerca de los mapas de decisiones basados en las síntesis de las películas, que también se encuentran en los anexos 3 y 4.

CAPÍTULO IV

Técnicas de recolección y análisis de datos.

Para las técnicas de recolección de datos basados en esta implementación se hizo uso de entrevistas semiestructuradas, mapas conceptuales, relatos y producciones escritas por los estudiantes, ya que estas facilitan la obtención de datos con buena información y contextualizados, todos esto enfocado al reconocimiento y desarrollo de los conceptos del determinismo clásico y sistemas caóticos.

El análisis de la información se llevó a cabo mediante la metodología de análisis de contenido, ya que *" el análisis de contenido es una metodología sistémica y objetiva porque utiliza, procedimientos, variables y categorías que corresponden diseño de estudios y criterios de análisis definidos y explícitos*" (Bernetr, s.f, p.194) así es como esta metodología permite realizar los estudios entre las diferentes producciones de los estudiantes y posibilita identificar, categorizar e interpretar los temas emergentes a partir de los relatos y registros obtenidos. Este procedimiento se desarrolló de manera inductiva, construyendo categorías de análisis que permitieron comprender en profundidad las concepciones y discursos de los estudiantes con respecto al fenómeno estudiado (teoría del caos), para garantizar así una correcta recolección e interpretación de estos datos. En esta sección se realizará el análisis de los resultados obtenidos en secuencia de actividades, buscando si se logró o no dar cumplimiento a cada objetivo planteado por actividad, el análisis se hará a partir de las producciones realizadas por los estudiantes las cuales según el formato de la actividad serán reescritas e interpretadas pero respetando la forma en la que fueron redactadas por cada grupo de estudiantes, estas respuestas serán analizadas con base a los criterios planteados anteriormente en el marco metodológico.

Análisis actividad inicial #1 (Escenas de películas)

En la primera actividad, los estudiantes respondieron a una pregunta orientada a explorar sus concepciones iniciales frente a la idea de determinismo y teoría del caos. A partir de la revisión de las respuestas (ver *Anexo 5*), se construyeron tres categorías de análisis con la cuales se busca dar respuesta a la identificación de concepciones previas que tienen los estudiantes acerca de este fenómeno.

Tabla 6 Análisis actividad inicial #1

Categoría de análisis	Descripción	Respuestas (actividad inicial #1) (anexo 5)	Conclusión
Científica (fisica)	Determinismo vinculado a leyes físicas y condiciones iniciales.	*"Si afecta porque al tomar una decisión tendré una consecuencia"*	Algunos estudiantes muestran nociones cercanas a la idea de que las decisiones personales tienen causas y consecuencias, lo que refleja un acercamiento al determinismo en fisica. Sin embargo, esta comprensión no se vincula explícitamente con las leyes de la física clásica.
Azar (probabilística)	Determinismo asociado al azar o probabilidad.	*"Depende, porque puede tomar una decisión buena"*	Otros estudiantes asociaron el determinismo con el azar o la probabilidad, lo que denota una confusión conceptual. Esta visión muestra que, para algunos, los eventos se perciben como dependientes de la suerte más que de condiciones iniciales determinadas.
Filosófica (destino)	Determinismo entendido como destino inmutable.	*"La manera en la que se actúa en el pasado"* *"Las decisiones del pasado que puedan afectar al futuro"*	Una parte de las respuestas reflejó una visión del determinismo como destino inmutable, en donde las decisiones pasadas definen de manera inevitable el futuro.

En general, los resultados indican que los estudiantes tienen nociones fragmentadas y heterogéneas sobre el determinismo. Si bien algunos se aproximan a una interpretación científica desde las condiciones iniciales, la mayoría de los que respondieron las preguntas iniciales lo concibe desde perspectivas filosóficas o de azar, lo que evidencia la necesidad de trabajar en la clarificación del concepto dentro de la propuesta didáctica, por lo que representa no una dificultad sino una oportunidad para desarrollar estos conceptos, ya que los estudiantes no presentan ideas previas ni mucho menos científicas acerca de los sistemas caóticos, mas bien estas nociones nos direccionan al determinismo clásico, pero no planteado formalmente.

Este hallazgo resulta coherente con el nivel de formación de los estudiantes, ya que en el grado octavo aún no han tenido un acercamiento formal a la teoría desde la física.

Análisis actividad inicial #2 (síntesis de las películas)

La segunda actividad tuvo como propósito hacer uso de las narrativas cinematográficas para explorar las concepciones previas de los estudiantes en relación con los sistemas caóticos. A partir de las respuestas recogidas (*ver Anexo 6: Tabla de respuestas actividad inicial #2*) y basándose en el análisis de la actividad anterior, los estudiantes debían dar respuesta a las preguntas planteadas en esta actividad basándose en las sinopsis de las películas, al responder estas el sentido era realizar un mapa de decisiones, esta actividad se encuentra en los anexos 3 y 4.

Por lo que, a partir de las respuestas de los estudiantes, se logra identificar lo siguiente:

En ambas películas, los estudiantes lograron reconocer que una decisión mínima desencadena múltiples consecuencias. En *The Butterfly Effect* (Bress & Gruber, 2004), varios grupos señalan que, si Evan interviene o no en el abuso hacia Kayleigh, el rumbo de la vida de ambos cambia de forma radical. En *Mr. Nobody*, la elección de Nemo entre quedarse con su madre o su padre abre caminos que conducen a vidas completamente diferentes. Desde la perspectiva de los sistemas dinámicos, esta escena icónica de la estación de tren representa un punto de bifurcación crítico en el espacio de fases de la narrativa. El estado del sistema que en esta narrativa es la vida de Nemo se encuentra en un punto de equilibrio inestable, donde una perturbación en las condiciones iniciales nos puede llevar a una evolución completamente distinta del sistema, esto nos muestra que los estudiantes logran captar la idea presentada para esta actividad y el objetivo central planteado para la misma, desarrollando la idea de que las pequeñas causas generan grandes

efectos, sin embargo también se identifica debido a las respuestas de los estudiantes, que hay una interpretación basada en categorías cotidianas o emocionales sin vincular estas respuestas al área de fisica o matemáticas, esto evidencia que comprenden la metáfora narrativa pero no la articulan aún con los sistemas dinámicos y el determinismo clásico.

Aquí se da cumplimiento al primer objetivo específico de esta investigación, ya que se logra evidenciar la dificultad de los estudiantes al traducir una narrativa emocional a un concepto abstracto, causalidad no lineal, imprevisibilidad, condiciones iniciales, ya que muchos estudiantes se basan en una visión determinista fuerte (si Evan no cambia nada, "todo saldrá bien" o "nadie sufrirá") y una visión caótica (los problemas empeoran cuando interviene). En *Mr. Nobody*, algunas respuestas incluso hablan de que "se reinventa" o "vive vacío", mostrando que los estudiantes ven múltiples futuros posibles, pero aún sin ligarlos a la imposibilidad de predicción precisa que plantea la teoría del caos.

Por último, basándose en las respuestas escritas por los estudiantes, ellos mismos deben construir un mapa de decisiones de "cómo" creen que se verían estas decisiones si las expresaran en un mapa, comparando estos mapas con los mapas planteados por el docente *(Anexo 11)* se evidencia que los mapas de los estudiantes suelen ser lineales, mostrando únicamente dos o tres decisiones principales, tendiendo a predecir desenlaces más comunes o posibles dentro de la narrativa, ya que en sus respuestas predomina lo emocional y anecdótico planteado en las escenas y sinopsis, los mapas de los estudiantes reflejan una comprensión narrativa y simplificada, mientras que los del maestro reflejan una visión sistémica y caótica, con múltiples escenarios que evolucionan simultáneamente. Confirmando así que los estudiantes no articulan estas respuestas con los sistemas caóticos, evidenciando de este modo que los estudiantes presentan dificultades con la noción de estos conceptos del caos.

Análisis actividad de desarrollo #3

Esta actividad tuvo como propósito consolidar la comprensión de los estudiantes frente a las nociones de determinismo clásico y sistemas caóticos, en esta actividad se realizó la implementación de una clase que abordó la explicación teórica e histórica del surgimiento de la teoría del caos y los sistemas deterministas clásicos, esto con propósito de consolidar estos conceptos para así lograr que los estudiantes realicen una reinterpretación de las nociones previas antes de esta, para esta clase se realizó la explicación y evolución del fenómeno de los sistemas

caóticos, partiendo desde los sistemas deterministas clásicos propuestos por Newton y Laplace, explorando la definición e interpretación que estos autores le dieron al fenómeno, hasta sus limitantes como lo serian la sensibilidad de condiciones iniciales y la precisión, estos limitantes serían, los que den paso para abordar la idea del caos y sus primeros indicios donde Henri Poincaré sería el primer autor en pensarse la idea de los sistemas caóticos, por último y para finalizar este repaso histórico hablamos de Edward Lorentz el autor principal del desarrollo de este fenómeno, Lorenz no inventó la metáfora del caos, pero sí descubrió y demostró matemáticamente la sensibilidad a las condiciones iniciales en sistemas dinámicos, y de allí nació el concepto del efecto mariposa, el concepto que se desarrolló principalmente en esta investigación para imbuir a los estudiantes de la teoría del caos y los sistemas dinámicos.

Basado en este repaso histórico, se planteó *(ver anexo #1 actividad #3)* esta actividad que buscaba como objetivo integrar lo trabajado en las actividades anteriores para que así los estudiantes lograran construir una idea significativa del determinismo y la teoría del caos desde una estructura científica y estructurada, para esto se empleó el uso de los mapas “redes de lanas” que en esta actividad se fundamenta en la necesidad de representar visualmente los procesos de decisiones y distintos caminos que caracterizan los sistemas caóticos, esta herramienta didáctica permite que los estudiantes construyan de manera tangible y por decisiones propias la representación de como las variaciones en las condiciones iniciales pueden generar trayectorias distintas, lo cual constituye un principio fundamental en la teoría del caos. Esta herramienta de los mapas también ofrece una metodología activa y participativa, que favorece el aprendizaje significativo al permitir que los estudiantes visualicen sus propias decisiones y consecuencias derivadas de estas, el uso de la lana brinda una metáfora concreta del sistema dinámico, donde cada decisión se convierte en un punto de bifurcación que modifica el curso del sistema.

Además, esta estrategia al ser planteada como trabajo en grupo (también en las anteriores actividades) promueve el trabajo colaborativo y la reflexión crítica ya que los estudiantes deben dialogar, discutir y consensuar las decisiones que toman, para así observar cómo cada decisión que toman genera nuevas ramificaciones, dentro del mismo esquema, de modo que estas redes de lanas no solo funcionan como un recurso visual, sino también como un instrumento que vincula lo narrativo, con lo físico y conceptual.

En el contexto de esta investigación, el uso de los mapas de redes de lana permitió a los estudiantes trasladar los conceptos teóricos de los sistemas caóticos a una experiencia práctica, observando la relación y diferencia entre el determinismo clásico y estos sistemas.

Ahora para analizar los resultados nos centraremos en tres características claves, (descripción y estructura, interpretación conceptual y nivel de comprensión) las cuales están propuestas en la tabla 6, basándonos en el anexo 8 *(ver anexo #8):*

Tabla 7 Análisis de respuestas Actividad #3

Actividad #3 (redes de lana)	**Descripción y estructura**	**Interpretación conceptual**	**Nivel de comprensión**
Grupo 1	Red lineal, pocas bifurcaciones, conexiones directas.	Representan un sistema estable y predecible, cada acción genera una consecuencia fija al ser un camino lineal.	Aun asocian la idea del mapa de redes con determinismo clásico.
Grupo 2	Red con ramificaciones simples, y algunos cruces, hicieron la red más en analogía de la representación de una mariposa	Muestran que una decisión puede generar varios caminos posibles, y que pueden conectarse entre sí.	Presentan la comprensión del fenómeno, lo exponen en su mapa, sin embargo, no conectan las ideas presentes en este.
Grupo 3	Red densa y entrecruzada, múltiples trayectorias, sin embargo, la lana, presenta un camino líneal.	Representan la complejidad del caos y la dependencia de	Tienen buena comprensión acerca de los sistemas caóticos y su representación.

		condiciones iniciales.	
Grupo 4	Red mixta, con bifurcaciones secundarias.	Reconocen que las decisiones alteran los resultados.	Representan de manera ideal las bifurcaciones propias de los sistemas caóticos.
Grupo 5	Red mixta, parcialmente lineal con tres bifurcaciones secundarias.	Sugiere la presencia de patrones estables o atractores dentro del caos.	También representan de manera ideal las bifurcaciones propias de los sistemas caóticos.

El análisis de las redes de lana evidencia una gradual evolución conceptual entre los grupos, mientras que en los primeros grupos (grupo 1 y grupo 2) muestran estructuras más lineales y una comprensión ligada al determinismo clásico, los grupos finales (grupo 4 y grupo 5) comienzan a representar bifurcaciones e interdependencias, y el grupo más avanzado (grupo 3) alcanza representaciones más complejas y coherentes con la teoría del caos.

Las producciones de los estudiantes reflejan como construyeron colectivamente estos significados a partir de la experiencia, el hilo deja de ser un elemento decorativo y se convierte en una metáfora del comportamiento de los sistemas dinámicos, donde cada decisión o variación inicial modifica el resultado global, sin llevarlos a un único resultado líneal, la actividad permitió evidenciar diferentes niveles de apropiación conceptual por parte de los grupos, esto favoreció el tránsito desde explicaciones lineales hacia representaciones más complejas y sistémicas, en coherencia con los principios del enfoque cualitativo planteado para esta investigación.

Continuando con esta misma actividad, se propuso realizar una entrevista semiestructurada al finalizarla. El uso de esta técnica responde a la necesidad de profundizar y consolidar las concepciones de los estudiantes sobre los conceptos de determinismo clásico y sistemas caóticos, si bien las producciones hechas por ellos como lo son las redes de lanas que les permiten realizar

representaciones visuales, estas no siempre evidencian otros procesos, por esto se propone el uso de una entrevista semiestructurada como una herramienta que permite acceder a las interpretaciones globales e individuales que los estudiantes construyen y elaboran mientras construyen significados y reflexionan acerca de sus representaciones.

Este tipo de entrevista permite profundizar aspectos sin limitar las respuestas de los estudiantes, en este caso las preguntas formuladas buscaban que los estudiantes relacionaran su producción (la red de lanas), con las narrativas cinematográficas y los conceptos de la teoría del caos abordados al principio de la actividad.

Las preguntas son diseñadas específicamente para cumplir y realizar una vinculación entre lo empírico con lo teórico, es decir relacionar la red con el efecto mariposa y los sistemas caóticos; a continuación, se realizará un análisis de cada pregunta utilizada en esta entrevista y también con la respuesta de cada grupo de estudiantes presentes en el anexo 9 *(ver anexo 9).*

Pregunta 1: ***¿En qué se parecen estos mapas que realizaron al efecto mariposa en la teoría del caos?***

Las respuestas de los grupos reflejan que la mayoría de los estudiantes identifican la idea central de la sensibilidad a las condiciones iniciales, idea principal del efecto mariposa. Expresan que, al igual que en el fenómeno descrito en la teoría del caos, "*acción pequeña puede tener una gran consecuencia"* o una acción mínima puede modificar el resultado final, esto evidencia un avance conceptual significativo frente a las actividades previas, ya que los estudiantes logran establecer una relación entre la representación física (la red de lana) y el principio teórico de la teoría del caos de manera implícita, también se observa una aproximación al principio de no linealidad, al reconocer que la relación entre causa y efecto no es proporcional. Sin embargo, en algunos casos, las respuestas se mantienen en un nivel metafórico o cotidiano, usando ejemplos emocionales o narrativos en lugar de la teoría o argumentos de la física.

Pregunta 2: ***¿En qué se parecen estos mapas de las películas trabajadas?***

La mayoría de los grupos estableció similitudes entre los mapas y las narrativas, destacando que tanto en las películas como en las redes *"una decisión cambia todo el curso de los acontecimientos*". Las relacionan directamente porque en las películas muestran historias variadas con posibles finales distintos, las redes de lana permiten visualizar todas las

bifurcaciones en el tiempo, mostrando la multiplicidad de futuros posibles, al igual que en las narrativas, estas respuestas evidencian un proceso de transferencia conceptual entre dominios narrativos y científicos. Los estudiantes logran entender la idea de bifurcación y de multiplicidad de trayectorias desde un soporte cinematográfico hacia una representación física, aunque algunos estudiantes tienden a interpretar estas bifurcaciones en términos emocionales, es decir en decisiones buenas o malas, en lugar de términos de variables iniciales o estados del sistema.

Pregunta 3: ***¿Cómo se puede relacionar esta idea del mapa con los sistemas caóticos en la física?***

En las respuestas de esta pregunta se observa una diversidad de niveles de comprensión. Algunos estudiantes mencionan que los sistemas caóticos "se comportan como las redes, cambiando según la posición o el punto de inicio", respuestas cómo:

> *"Que no son predecibles, pues todo empieza en estos dos, que pasa si me coge el sueño o si no me coge el sueño, depende de uno mismo, entonces es impredecible en este punto."*

Lo que indica un entendimiento básico del concepto de dependencia de condiciones iniciales, más bien desarrollan o piensan en este fenómeno interpretándolo como un sistema determinista, aunque tienen la idea de las condiciones iniciales, pero algunos de estos lo asocian a que son sistemas predecibles. Sin embargo, otros estudiantes van más allá y mencionan la imprevisibilidad o la imposibilidad de predecir con exactitud la evolución del sistema. Sin embargo, en algunas respuestas se evidencia una confusión entre caos y azar, lo que pone de manifiesto una tensión conceptual entre determinismo y aleatoriedad. El diálogo generado a partir de la pregunta permitió hacer visible esta tensión y favoreció la reflexión, evidenciando las representaciones intermedias que los estudiantes construyen en su tránsito hacia un pensamiento científico más estructurado.

Pregunta 4*:* ***¿El resultado final era predecible desde el inicio?***

Las respuestas fueron mayoritariamente negativas, los estudiantes coincidieron en que "*no se podía saber cómo iba a quedar la red"* o "*porque lo fuimos construyendo".* Este reconocimiento de la imprevisibilidad del resultado final muestra que los estudiantes lograron comprender, desde la experiencia, la naturaleza no lineal y dependiente del proceso, algunos grupos complementaron sus respuestas mencionando que, aunque el sistema parecía caótico, seguía ciertas reglas o

“dependía del orden en que se tomaban las decisiones”, a esto la idea de que lo iban construyendo, lo que revela una comprensión inicial del carácter determinista pero impredecible de los sistemas caóticos, esta pregunta permitió evidenciar que los estudiantes reconocen la imposibilidad de predicción precisa dentro de un sistema regido por caos, esto es uno de los indicios más claros de apropiación conceptual lograda mediante la actividad.

La entrevista semiestructurada del Anexo 9 funcionó como un instrumento clave para fomentar la argumentación de la información obtenida en las producciones materiales y verbales de los estudiantes. Las respuestas de los estudiantes evidencian un proceso de evolución conceptual que se hizo visible a través del diálogo guiado en el aula, en el cual se promovió la confrontación entre explicaciones iniciales de carácter narrativo, emocional y preguntas orientadas a problematizar la predictibilidad, la sensibilidad a las condiciones iniciales y el carácter determinista de los sistemas caóticos. Este intercambio permitió que los estudiantes reformularan progresivamente sus explicaciones, transitando hacia una comprensión más estructurada de los principios de la teoría del caos y del determinismo clásico.

Análisis actividad de cierre #4

La actividad #4 correspondió a la fase final de la secuencia didáctica, y tuvo como propósito consolidar las comprensiones construidas por los estudiantes en torno a los conceptos de determinismo clásico, efecto mariposa y sistemas caóticos, integrando las experiencias previas (películas, redes de lana, reflexiones orales) en una síntesis conceptual y reflexiva de manera escrita, las respuestas de esta actividad se encuentran en el anexo 10 *(ver anexo 10)* del cual se basó para dar la interpretación de estos datos y responder al cumplimiento o no del objetivo de esta actividad.

A través de esta actividad se buscó evaluar no solo la adquisición de conceptos, sino también la capacidad de los estudiantes para articular ideas, establecer relaciones entre fenómenos físicos, cómo lo fue el del péndulo doble, asociándolo a videos de este que habían visto con anterioridad en redes sociales pero no analizado profundamente, también representaciones simbólicas, en las respuestas de la actividad #4 se observa que los estudiantes logran reconocer la coexistencia entre determinismo y caos, identificando que los sistemas caóticos no son desordenados ni aleatorios, sino que responden a leyes precisas, donde pequeñas variaciones en las condiciones iniciales pueden producir resultados imprevisibles, frases como *“no todo se puede predecir”* o *“si*

tuviéramos conocimiento sobre todo lo que pasa en el mundo, podríamos predecir las cosas, pero en la práctica es más caótica" demuestran que los estudiantes asumieron una visión más compleja y científica del fenómeno, este avance conceptual es significativo si se compara con las primeras actividades, en las que predominaban concepciones de caos como sinónimo de desorden o azar, en esta etapa los estudiantes ya reconocen la dependencia sensible de las condiciones iniciales y la no linealidad como características esenciales del comportamiento caótico. Esta última actividad cumplió una función de cierre y evaluación formativa, permitiendo al docente observar cómo los estudiantes reconstruyen sus concepciones tras haber transitado por la secuencia didáctica basada en experiencias narrativas, visuales y reflexivas, el hecho de que los estudiantes lograran vincular sus producciones con los fenómenos físicos, desde fenómenos deterministas como lo es caída libre o movimiento parabólico, hasta un sistema caótico como el péndulo doble, vinculando estos fenómenos con las narrativas, lo que demuestra que esta estrategia, basada en el uso de herramientas didácticas, favorece la comprensión de los conceptos abordados, para generar aprendizaje significativo para este curso de grado octavo.

La secuencia de actividades implementada en el marco de esta investigación tuvo como finalidad comprender cómo los estudiantes de grado octavo construyen y transforman sus concepciones sobre el determinismo clásico y la teoría del caos, mediante el uso de narrativas cinematográficas y herramientas didácticas que posibilitaran el tránsito desde el pensamiento lineal hacia una visión más compleja y dinámica del mundo físico, en síntesis y desarrollando los objetivos específicos con cada una de estas actividades se logró evidenciar que:

El primer objetivo específico planteado por esta investigación se cumplió ampliamente, pues las actividades permitieron visibilizar y comprender las dificultades conceptuales iniciales presentadas por los estudiantes, así como seguir su construcción progresiva conceptual a lo largo de la secuencia.

Para el segundo objetivo se cumple plenamente, ya que las narrativas cinematográficas demostraron ser una estrategia efectiva y significativa para construir conceptos y facilitar la comprensión de los sistemas caóticos y deterministas, esto se logró al conectar lo afectivo, lo simbólico y lo conceptual planteado por los estudiantes en toda la secuencia.

El tercer objetivo se cumple de manera significativa, pues las respuestas evidencian una evolución conceptual sostenida a lo largo de las cuatro actividades. La propuesta resultó eficaz

para fomentar la transición desde una visión determinista rígida y basado en las narrativas y emociones de los estudiantes, en un tránsito hacia una comprensión científica del caos y determinismo.

Análisis de segunda secuencia de actividades (Comunidad de indagación)

Esta implementación (*ver anexo #2*) se desarrolló con una comunidad de indagación perteneciente a la electiva *Asombro e imaginación* de la Universidad Pedagógica Nacional, El grupo estuvo conformado por estudiantes de distintas licenciaturas y semestres, lo cual aportó una diversidad de perspectivas y modos de razonamiento sobre los temas de determinismo, caos y toma de decisiones.

Cabe aclarar que la actividad fue diseñada como una secuencia abreviada, inspirada en la secuencia principal aplicada en el colegio, con el propósito de comparar los procesos de comprensión entre ambas poblaciones, durante esta secuencia de actividades los participantes abordaron la presente en busca de una indagación colectiva, mas que como una actividad guiada, esto permitió la construcción conceptual donde las ideas emergían desde la discusión y no desde una guía cerrada.

Para el análisis de las respuestas registradas en el anexo 12, se evidencia que los participantes asocian las ideas del determinismo desde un enfoque filosófico y ético, aunque preguntándose por la libertad y la responsabilidad en un universo gobernado por leyes, basados en la actividad de la red de lanas los participantes lograron construir una representación más abstracta del caos, reconociendo que su imprevisibilidad no contradice el determinismo, sino que lo complejiza.

En la primera actividad un participante basándose en las escenas de las narrativas cinematográficas respondió lo siguiente

> *"Yo creo que se relacionan un poco con la compañera, acerca del fenómeno de causa y efecto"*

La respuesta refleja que el participante tiene ideas previas del fenómeno de causalidad, pero se apoya en la causalidad clásica como punto de referencia, es decir que reconoce la causalidad, pero todavía no incorpora del todo la no linealidad o la sensibilidad a condiciones iniciales, se encuentra en un punto intermedio entre el pensamiento determinista y las nociones de sistemas

caóticos, ya que muestra una comprensión incipiente del caos determinista, donde las causas siguen existiendo, pero no donde los efectos pueden divergir enormemente.

Para la segunda actividad y basado en las respuestas del anexo 12, se reconoce que los participantes vincularon las escenas cinematográficas con conceptos como azar y causalidad, destacando la imposibilidad de un control absoluto sobre los sistemas complejos, y por ultimo los estudiantes se llevaron la idea o entendieron el caos más hacia lo causal e imprevisible, sin embargo, al analizar las respuestas se siguen sosteniendo en una postura filosófica y ética.

Pero en esta respuesta en concreto:

"Un efecto, de un cambio, nada es para siempre."

La implementación de una comunidad de indagación se justifica porque el objetivo de esta investigación no se limita a la transmisión de contenidos formales sobre la teoría del caos, sino que busca comprender cómo los estudiantes construyen, transforman y reformulan sus explicaciones frente a un concepto científico. Dado que nociones como la sensibilidad a las condiciones iniciales, la imprevisibilidad determinista y la no linealidad suelen ser interpretadas inicialmente desde marcos cotidianos o metafóricos, se hizo necesario generar un espacio de diálogo estructurado que permitiera confrontar dichas interpretaciones con argumentos de carácter científico. Desde esta perspectiva, la comunidad de indagación favorece la exploración colectiva de ideas, la argumentación y la problematización conceptual, aspectos fundamentales para el tránsito desde explicaciones narrativas o intuitivas hacia una comprensión más rigurosa de los modelos físicos asociados a la teoría del caos. Asimismo, este enfoque resulta especialmente pertinente al trabajar con narrativas cinematográficas, ya que estas movilizan interpretaciones diversas que solo pueden ser analizadas críticamente mediante la interacción, la discusión guiada y la reflexión conjunta. De este modo, la comunidad de indagación se constituye no solo como una estrategia pedagógica, sino como un dispositivo metodológico coherente con el carácter no lineal del aprendizaje y con la necesidad de hacer visibles las representaciones intermedias de los estudiantes.

Conclusiones

El uso de narrativas cinematográficas se consolidó como un recurso didáctico significativo al permitir que los estudiantes establecieran una relación entre su experiencia previa y el fenómeno

físico de la sensibilidad a las condiciones iniciales, característico de los sistemas deterministas no lineales estudiados por la teoría del caos. A través de narrativas como *The Butterfly Effect* (Bress & Gruber, 2004) y *Mr. Nobody* (Dormael, 2009), los estudiantes pudieron interpretar, desde un plano narrativo, cómo pequeñas variaciones iniciales pueden dar lugar a consecuencias divergentes, lo que facilitó la exploración de conceptos físicos como causalidad, condiciones iniciales y límites de la predicción, diferenciando progresivamente entre metáfora narrativa y modelo científico, explorando conceptos como causalidad, condiciones iniciales, decisión y consecuencia. Es por esto que la narrativa no solo funcionó como un detonante emocional, sino como un recurso didáctico que permitió traducir la complejidad científica en experiencias comprensibles y cercanas, de esta manera, se cumplió uno de los objetivos específicos del trabajo el cual consistía en mostrar el potencial de la narrativa como facilitadora para afianzar el entendimiento de conceptos abstractos y complejos de la teoría del caos.

El análisis detallado de las respuestas y producciones de los grupos de estudiantes de grado octavo permitió evidenciar un proceso progresivo de cambio conceptual en la comprensión del caos y del determinismo. Al inicio del trabajo, las explicaciones del grupo se caracterizaban por una visión mecanicista y lineal del mundo físico, en la que predominaba la idea de un universo completamente predecible, coherente con el determinismo clásico asociado a Newton y Laplace. En esta etapa, los estudiantes tendían a interpretar la imprevisibilidad como error, desorden, falta de control e incluso azar. A medida que se desarrollaron las actividades propuestas, se generaron espacios de diálogo y confrontación conceptual que permitieron cuestionar dicha concepción inicial. En las producciones intermedias se observó la emergencia de explicaciones que reconocían la influencia de pequeñas variaciones iniciales en el desarrollo de los sistemas, aunque aún expresadas en un lenguaje narrativo o metafórico.

Finalmente, en las reflexiones posteriores y en la entrevista semiestructurada, el grupo logró articular estas ideas con principios propios de la teoría del caos, reconociendo explícitamente la sensibilidad a las condiciones iniciales y la imprevisibilidad como propiedades de sistemas deterministas no lineales. Este tránsito evidenció una resignificación del concepto de caos, que dejó de ser entendido como desorden para ser concebido como una forma de orden no lineal, dando cuenta de una comprensión más crítica y cercana a los modelos científicos contemporáneos. De este modo, el trabajo permitió acompañar el paso desde un pensamiento

determinista rígido hacia un pensamiento sistémico y complejo, coherente con la física que describe fenómenos del mundo cotidiano.

En coherencia con el enfoque cualitativo descriptivo adoptado, este estudio prioriza la comprensión y el análisis interpretativo de las experiencias de los participantes. Siguiendo a (Moreira, 2002) el enfoque cualitativo descriptivo y la técnica de análisis de contenido fueron fundamentales para comprender las transformaciones conceptuales de los estudiantes, esta técnica como lo señala (Bernetr, s.f) no solo permitió analizar los resultados visibles de las actividades, sino también los procesos de pensamiento, diálogo e interpretación que emergieron durante la implementación. Las producciones escritas y las entrevistas revelaron que el conocimiento se construye de manera colectiva y relacional, especialmente cuando se propician espacios de indagación y discusión guiada.

La implementación complementaria de la comunidad de indagación permitió realizar un análisis comparativo más profundo entre los dos contextos educativos distintos, evidenciando no solo diferencias atribuibles al nivel de formación, sino también elementos comunes en la construcción del pensamiento científico. En el contexto escolar, los estudiantes se aproximaron al caos principalmente desde una experiencia visual y vivencial, apoyándose en representaciones concretas y narrativas para interpretar la sensibilidad a las condiciones iniciales. En contraste, los estudiantes universitarios abordaron el fenómeno desde un plano más reflexivo y filosófico, articulando la discusión hacia dimensiones causales y éticas. No obstante, más allá de estas diferencias contextuales, en ambos grupos se identificó una comprensión compartida del caos como un fenómeno determinista no lineal, lo que sugiere que el desarrollo del de los conceptos del caos no están restringidos a un nivel educativo específico, sino que depende de las condiciones pedagógicas que favorezcan el diálogo, la argumentación y la reflexión colectiva. En este sentido, la comunidad de indagación se consolidó como un dispositivo que posibilita la construcción de comprensiones científicas profundas en contextos educativos diversos.

La propuesta didáctica muestra que el aprendizaje significativo emerge cuando la ciencia se enseña desde la experiencia, la narrativa y la complejidad, permitiendo que los estudiantes construyan sentido, reflexionen y se reconozcan como parte del sistema que intentan comprender, asociando así este fenómeno con la cotidianidad y la importancia de los sistemas.

Para finalizar, este trabajo demuestra que abordar la enseñanza de la física desde la teoría del caos, y en particular desde el estudio de la sensibilidad a las condiciones iniciales en sistemas deterministas no lineales, permite transformar la manera en que los estudiantes conciben el conocimiento científico. A través del análisis de sistemas físicos como lo fue el péndulo doble y el sistema meteorológico y de su representación gráfica mediante los espacios de fases también junto a sus autores de indagación, el caos deja de ser entendido como lo opuesto al orden o como sinónimo de complejidad, para revelarse como un fenómeno físico regido por leyes, en el que la incertidumbre y la imprevisibilidad constituyen propiedades inherentes de la dinámica de los sistemas. Esta conexión no se limita a la mera coincidencia de que tanto en el péndulo como en las narrativas existan variaciones en las condiciones iniciales. El vínculo es estructural, la estructura narrativa de películas con múltiples líneas temporales presentes opera como una analogía directa y un modelo visual de las trayectorias en el espacio de fases de un sistema caótico como el péndulo doble o un sistema meteorológico donde se evidenció que el sistema evoluciona según sus condiciones iniciales. Mientras que en el péndulo físico resulta abstracto entender cómo una pequeña variación en los ángulos iniciales desvía la trayectoria en una variedad tetradimensional, la narrativa cinematográfica materializa esta divergencia al proyectar trayectorias de vida completamente distintas a partir de un evento infinitesimal inicial concebido como la perturbación inicial. Así, el cine actúa como un laboratorio virtual y cualitativo que permite a los estudiantes visualizar el espacio de fases y comprender que el caos no es desorden destructivo ni azar absoluto, sino una estructura ordenada de infinitas trayectorias posibles gobernadas por un determinismo.

En este sentido, el aporte de este trabajo a la enseñanza de la física radica en mostrar que conceptos tradicionalmente considerados abstractos o de difícil acceso en la malla curricular pueden ser abordados de manera significativa cuando se articulan modelos físicos, representaciones narrativas y espacios de diálogo reflexivo. Esta articulación favorece el tránsito desde explicaciones mecanicistas y lineales hacia una comprensión más sistémica y compleja de los fenómenos naturales, alineada con la física contemporánea y con la experiencia cotidiana de los estudiantes. Así, el estudio del caos no solo amplía los contenidos de la física escolar, sino que contribuye a la formación de una mirada científica crítica, capaz de reconocer el cambio y la

sensibilidad como dimensiones fundamentales tanto del aprendizaje como de la realidad física de cada estudiante.

Se recomienda incorporar de manera intencionada el uso de recursos como las narrativas cinematográficas en la enseñanza de la física, ya que permiten abordar conceptos abstractos cómo la teoría del caos de forma más accesible, significativa y cotidiana al estudiante. Así mismo, es fundamental promover espacios de diálogo y reflexión que favorezcan la construcción y el desarrollo de conceptos para así llevar a cabo un cambio de paradigma. En este sentido, se invita a adoptar propuestas didácticas, innovadoras e interdisciplinarias que se encuentren por fuera del aula y en la cotidianidad, como es el caso de las narrativas y que reconozcan la complejidad del conocimiento científico para enriquecer los procesos de enseñanza y aprendizaje.

Es fundamental señalar los límites epistemológicos y didácticos de la analogía cinematográfica utilizada. Si bien la película *El efecto mariposa* resulta eficaz como detonante motivacional para introducir la sensibilidad a las condiciones iniciales, presenta licencias narrativas que se alejan del rigor de la física. Por ejemplo, la premisa de que el protagonista conserva los recuerdos de líneas temporales alternativas mientras modifica el pasado constituye una violación a la irreversibilidad biológica y a la flecha del tiempo. En los sistemas dinámicos reales, la irreversibilidad no implica un viaje en el tiempo con retención de conciencia, sino la imposibilidad práctica y termodinámica de retornar al estado microscópico exacto debido a la disipación de energía y el aumento de entropía.

Señalar estas divergencias resulta imprescindible para futuras implementaciones pedagógicas, evitando que los estudiantes trasladen concepciones alternativas erróneas desde la divulgación hacia la física formal. Lejos de desestimar el recurso, esta limitación debe aprovecharse en el aula como un ejercicio reflexivo donde los estudiantes identifiquen dónde termina la física determinista y dónde empieza la ficción narrativa, consolidando así una comprensión rigurosa de lo que realmente constituye un sistema reversible e irreversible.

A modo de balance sobre la experiencia pedagógica, la selección de las escenas cinematográficas resultó ser altamente asertiva como detonante cognitivo e intuitivo. El cine demostró una capacidad excepcional para capturar la atención de los estudiantes, desestabilizar sus concepciones previas y generar un terreno fértil para la discusión de conceptos abstractos como la

impredecibilidad, la sensibilidad a las condiciones iniciales y la ruptura del determinismo mecanicista que habitualmente resultan áridos mediante el lenguaje puramente algebraico.

No obstante, el análisis de la implementación revela que la narrativa por sí sola presenta límites epistemológicos claros. El error más evidente al no lograr una formalización del fenómeno es la fijación de *concepciones alternativas* y la distorsión del rigor científico. Cuando la ficción cinematográfica no se contrasta formalmente con el modelo físico, los estudiantes tienden a trasladar las licencias narrativas al plano conceptual. Esto se traduce en confusiones graves, tales como asumir que el caos es sinónimo de azar o desorden absoluto, atribuir conciencia o confundir la sensibilidad a las condiciones iniciales con viajes temporales e irreversibilidades biológicas. La narrativa genera la intuición, pero sin la transición hacia la explicación del fenómeno la comprensión permanece en un nivel puramente metafórico.

Bibliografía

Arango, O. (2019). La teoría de los sistemas no lineales: mezcla de azar y determinismo. *Revista Facultad de Trabajo Social*, 53-65.

Barriga, Á. D. (2013). Guía para la elaboración de una secuencia didactica. *Comunidad de conocimiento UNAM*, 1-14.

Bernetr, F. (s.f). Análisis de contenido. En A. L. Marín, *Conocer lo Social: Estrategias, técnicas de construcción y análisis de datos* (págs. 194-196). Madrid: FRAGUA.

Bress, E., & Gruber, M. (Dirección). (2004). *The Butterfly Effect* [Película].

Camaño, C. (2012). La narrativa en la enseñanza. *https://www.camaradellibro.com*, 1-9.

Carrera, J. (2023). *Producciones cinematográficas de superhéroes como recurso didáctico para la enseñanza de la física*. Universidad Pedagogica Nacional. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

Castellón, J. G. (2007). Narrativa cinematográfica y enseñanza del cine. *Grupo comunicar*, 75-80.

Coppo, J. (2010). Teoría del caos y método científico. *Revista Veterinaria*, 157-167.

Corredoira, M. L. (2001). Determinismo en la física clásica: Laplace vs. Popper o Prigogine. *EL BASILISCO*, 29-42.

Dormael, J. V. (Dirección). (2009). *Mr. Nobody* [Película].

Francisca Petit Pérez, J. S. (2012). LA CIENCIA FICCIÓNY LA ENSEÑANZA DE LAS CIENCIAS. *ENSEÑANZA DE LAS CIENCIA*, 55-71.

Francisca Petit, J. S. (2012). Aprendiendo ciencia y sobre ciencia en las aulas de secundaria. *Enseñanza de las ciencias*, 153-170.

Gallego, J. D. (2012). La función de la narrativa en la ciencia y en la investigación pedagógica. *Hallazgos*, 143-158.

García, R. (2007). El cine como recurso didáctico. *Revista de Filosofía*, 123-126.

Gil, D. (2005). INMERSIÓN EN LA CULTURA CIENTÍFICA PARA LA TOMA DE DECISIONES. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 302-329.

González, M. J. (2009). La Teoría del Caos en las Organizaciones. *cuadernos unimetanos*, 29-33.

Guerrero, G. (2000). Determinismo, modelos y modalidades. *Revista de filosofía*, 191-216.

Hernández, S., Collado, R. F., Baptista, C., & Plar, L. (2014). *El enfoque cualitativo en la investigación científica*. Lima: McGraw-Hill Education.

Hewitt, P. (2016). *Física conceptual*. Pearson.

Hurtad, J. D. (18 de Septiembre de 2015). Sistema de creencias sobre las matemáticas en los estudiantes de educación básica. *Revista Praxis*, 163-168.

John P. Briggs, F. D. (2001). *Las siete leyes del caos: Las ventajas de una vida caótica*. Barcelona: HarperCollins Publisher.

Koval, M. I. (2022). Ciencia y "narratividad". Hacia una clasificación de los usos de la narración en ciencias exactas y naturales. *LETRAS*, 152-167.

Marques, L. B. (s.f.). Teoria do caos no cinema. *Trabalho referente às postagens no blog Cine Caos* . Faculdades Integradas Hélio Alonso, Rio de Janeiro.

Martin, D. (2023). Simulación del péndulo doble como herramienta para la enseñanza del caos. *Góndola, Enseñanza y Aprendizaje de las ciencias*, 1-11.

Morales, A. (2020). *Una aproximación a la dinámica no lineal por medio del estudio del fenómeno meteorológico* . Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

Moreira, M. A. (2002). *Investigación en educación en ciencias: métodos cualitativos*. Burgos: Universidad de Burgos (España) y Universidade Federal do Rio Grande do Sul (Brasil).

Moya, A. M. (2010). Recursos didácticos en la enseñanza. *Revista digital del Sindicato Independiente de Profesores (CSIF).*, 1-9.

Nuñez, Y., & Brito, S. (2013). *Poincaré la mecánica clásica y el teorema de la recurrencia*. Iztapalapa: Universidad Autónoma Metropolitana.

Oro, J. d. (2023). *Los límites de la predicción meteorológica: Las ecuaciones de Lorenz y el efecto mariposa* . Madrid: Universidad Complutense de madrid.

Quecedo, R., & Garrido, C. (2002). Introducción a la metodología de investigación cualitativa. *Revista de psicodidáctica*, 5-39.

Rincón, R. S. (2016). *Ciencia ficción en la enseñanza de la física*. Bogotá: Universidad Pedagógica Nacional.

Satos, C., Simarro, J., & fuertes, D. (2019). Física del caos en la predicción meteorológica. *Física del caos*, 56-71.

Sierra, D. (2023). Secciones de poincaré: delatando el caos en el pendulo doble. *Paskín Matemático*, 1-8.

Smith, P. (2007). *El caos.* Madrid: Cofas S.A.

Anexos

Anexo 1 Diseño de la secuencia de actividades #1

SECUENCIA DIDÁCTICA DE ACTIVIDADES #1
Duración: Tres sesiones (cinco horas)
Tema general: Introducción teoría del caos
Objetivo de enseñanza: propiciar la construcción de significado de los conceptos del caos, introduciendo la idea de la imprevisibilidad de los sistemas caóticos.
LÍNEA DE SECUENCIAS DIDÁCTICAS
Actividades de apertura (120 minutos)
Actividad #1 Contextualización inicial (motivación) **Actividad inicial:** Iniciar la clase mostrando una escena de cada película. • De *El efecto mariposa*: la escena donde Evan se encuentra en la cárcel y viaja al pasado para hacerse cicatrices en las manos y que el otro presidiario le creyera. • De *Mr. Nobody*: El momento en que Nemo niño debe elegir entre ir con su padre o con su madre. **Objetivos:** *identificar las ideas previas de los estudiantes frente a los conceptos del efecto mariposa y los fenómenos caóticos, para así ver la noción de estos en las narrativas cinematográficas.* Después de haber realizado la visualización de los videos por parte de los estudiantes, el docente guiará la actividad con las siguientes preguntas claves. ***¿Creen que estos dos fragmentos de historias distintas tengan algo en común?*** Después de dar respuesta a la pregunta anterior se continua con la siguiente pregunta ***¿Una pequeña decisión podría cambiar el rumbo de nuestra vida?***

Las respuestas a estas preguntas serán registradas para hacer parte del análisis que se desarrollará más adelante, esta actividad nos permitiría permearnos de las ideas previas que los estudiantes tengan frente a la teoría del caos, guiando al estudiante hacia las variables cambiantes, en este caso el espacio tiempo.

Actividad #2
Construcción de significado (reconocimiento del concepto)

Objetivos: *hacer uso de las narrativas cinematográficas como recurso didáctico para la construcción la aproximación al concepto de los sistemas dinámicos y del efecto mariposa*

- Actividad en grupo: cada grupo recibirá una breve sinopsis de alguna de las películas (tres grupos por película), en la cual los estudiantes deberían identificar como podría una decisión pequeña desencadenar un cambio enorme en la historia de la película (ver anexo 3 y 4).
- Después de esto cada grupo debe realizar un mapa de decisiones mostrando como se ramifican estas distintas decisiones o consecuencias.

Para finalizar esta actividad el docente enseña las dos escenas finales de las películas.

Actividades de desarrollo (150 minutos)

Actividad #3
Repaso histórico (construcción del concepto)

Objetivos: *Examinar como mediante un repaso histórico del surgimiento de la teoría del caos y llevar a cabo la construcción de los conceptos y relación de los fenómenos caóticos y el efecto mariposa, para así fortalecer y evidenciar el desarrollo de los conceptos adquiridos.*

El docente se encargará de realizar un barrido histórico, basándose en el marco teórico de esta investigación; desde el determinismo clásico hasta el surgimiento de la teoría del caos y brindar una breve explicación del efecto mariposa y relacionarlo con ejemplos que se podrían evidenciar en la vida cotidiana, asimismo enseñando el sistema del péndulo doble como evidencia de un sistema físico, después de esto los estudiantes deberán realizar la siguiente actividad:

En esta actividad se realizará un juego en el que los estudiantes basárepresentando,breve historia inicial deberán tomar decisiones, un estudiante en cada grupo deberá estar en un punto fijo sosteniendo la lana, cada historia tendrá diferentes decisiones las cuales irán

construyendo los mismos estudiantes por situaciones impartidas por el docente, cada decisión distinta hará que la lana tome un camino no lineal, enredándose para crear así una "red de lana" distinta por cada grupo, esta red debería representar visualmente el camino de decisiones que tomó cada grupo para construir su historia y representando así cómo distintas decisiones generan distintos futuros.

La situación primaria o condición inicial planteada es la siguiente "me levanté tarde…" a partir de esta primera frase los estudiantes crearán su red de lanas

El profesor pasará por cada grupo para plantearles en formato entrevista planteando preguntas que los estudiantes deberán responder debido a sus "red de lanas"

- **¿En qué se parece estos mapas que realizaron al efecto mariposa en la teoría del caos?**
- **¿En qué se parecen estos mapas de las películas trabajadas?**
- **¿Cómo se puede relacionar esta idea del mapa con los sistemas caóticos en la fisica?**
- **¿El resultado final era predecible desde el inicio?**

Actividades de cierre (30 minutos)

Comparación y análisis crítico (reflexión)

Actividad #4

Objetivo: *comparar y realizar un análisis crítico acerca de los conceptos adquiridos para fomentar el pensamiento crítico y la reflexión acerca del efecto mariposa.*

Por último, cada grupo de estudiantes deberá realizar un escrito basándose en las siguientes preguntas, planteadas a modo de reflexión.

- **¿Qué nos enseñan estas películas acerca de qué tan predecible es el futuro?**
- **¿Es posible anticipar todo lo que ocurrirá como se pensaba en la física clásica, o el universo es más caótico de lo que imaginábamos?**
- **¿Qué aprendí sobre la importancia de las decisiones en la ciencia y en la vida?**
- **¿Toda decisión me garantizará un único resultado?**

Anexo 2 Diseño de la secuencia de actividades #2

SECUENCIA DIDÁCTICA DE ACTIVIDADES #2

Duración: Una sesión (una hora)

Tema general: Introducción al efecto mariposa.

Objetivo de enseñanza: Propiciar la construcción de significado de los conceptos del caos, introduciendo la idea de la imprevisibilidad de los sistemas caóticos para estudiantes de distintas licenciaturas.

LÍNEA DE SECUENCIAS DIDÁCTICAS

Actividades de apertura (15 minutos)

Contextualización inicial (apertura de comunidad de indagación)

Actividad # 1

Esta actividad está planteada para una comunidad de indagación formada por estudiantes de distintas licenciaturas.

Actividad inicial: Iniciar la comunidad de indagación mostrando una escena de cada película.

- De *El efecto mariposa*: la escena donde Evan retrocede en el tiempo y cambia una decisión.
- De *Mr. Nobody*: El momento en que el niño debe elegir entre ir con su padre o con su madre.

Objetivos: *Reconocer a partir de estas escenas cinematográficas como el efecto mariposa se evidencia en las narrativas, generando preguntas y reflexiones que permitan iniciar una comunidad de indagación sobre el efecto mariposa y su relación con la vida cotidiana y la formación profesional.*

La pregunta que guiará esta comunidad de indagación y abrirá el paso para el debate, es la siguiente:

¿Creen que estos dos fragmentos de historias distintas tengan algo en común?

Actividades de desarrollo (25 minutos)

Actividad #2

Objetivos: *Fomentar el uso de herramientas didácticas como recurso para la enseñanza del efecto mariposa en aula distinta a la de fisica.*

En esta actividad el docente deberá formar un círculo con todos los estudiantes de la comunidad de indagación, inicialmente un estudiante sostendrá el extremo inicial de un ovillo la lana y deberá decir una acción inicial para iniciar una historia de acciones y consecuencias construida por toda la comunidad.
A continuación, el estudiante sin soltar la punta de la lana, deberá tirarle el ovillo a otra persona al azar, la cual deberá responder con una consecuencia a la acción planteada por el estudiante anterior.
Este proceso se repetirá hasta que todos los estudiantes estén conectados con la lana y se forme una telaraña, al estar todos conectados con la misma red de lana, todos los estudiantes sentirás las perturbaciones, es decir si alguno hala o tira del hilo los demás sentirán la perturbación, así es como una pequeña acción afecta a todo un sistema, en esta actividad se prioriza el concepto de interconectividad, pero también se asocia con la no linealidad.
Para cerrar esta actividad algunos los estudiantes deberán romper la dinámica de la lana desordenándose y tirando de esta para provocar la alteración del orden anterior, para conectar con la idea del efecto mariposa y la imprevisibilidad de los sistemas caóticos.

Para finalizar se les pregunta a algunos estudiantes si pensaron que la acción inicial que plantearon tendría la misma consecuencia propuesta por el compañero que respondió a su acción.

Actividades de cierre (20 minutos)

Análisis y reflexión

Actividad #3

Objetivo *Promover la reflexión colectiva en torno a la imprevisibilidad de los sistemas caóticos y las consecuencias de las acciones, para analizar como el efecto mariposa cuestiona la posibilidad de predictibilidad de los sistemas deterministas.*

En esta actividad el docente iniciará un dialogo con la comunidad de indagación proponiendo la siguiente pregunta:

¿Podemos realmente predecir todas las consecuencias de nuestras acciones como lo pensaba la fisica clásica?

Por último, para cerrar la comunidad de indagación se les pedirá a algunos estudiantes que hagan una metáfora con una frase de:

"me llevo la idea de que el efecto mariposa es…"

Y con la metáfora construida por algunos estudiantes se cierra esta secuencia de actividades.



Ilustración 1Ilustración Nemo escogiendo entre dos caminos. Imagen usada para actividad en la clase de física. Tomada de https://jaumefigavaello.com/2011/03/17/las-vidas-posibles-de-mr-nobody/



Ilustración 2 Evan y Kayleigh en distintos momentos. Imagen usada para actividad en clase de fisica. Tomada de https://practicasccurn.wordpress.com/2015/04/27/el-efecto-mariposa-3/

Anexo 3 Actividad #2 actividad inicial de apertura #2

Mr Nobody



Nemo Nobody es un hombre anciano que recuerda todas las vidas posibles que pudo haber tenido. Su historia comienza cuando, de niño, se encuentra en una estación de tren, frente a la decisión crucial de irse con su madre o quedarse con su padre. Desde allí, su vida se divide en múltiples realidades posibles.

En una de ellas, Nemo se va con su madre y conoce a Anna, con quien comparte un amor intenso y profundo, pero lleno de obstáculos. La decisión de confesarle o no sus sentimientos determina si llegan a estar juntos o se pierden para siempre.

En otra, Nemo se queda con su padre y conoce a Elise, con quien se casa, pero el matrimonio se ve marcado por la depresión de ella y una vida emocionalmente muy dolorosa. En otro camino, conoce a Jeanne, con quien vive una vida aparentemente estable y cómoda, aunque vacía y carente de pasión.
En esta actividad deberás tratar de predecir cada decisión que tomó Nemo, basándote en las preguntas y el resumen de la película que leíste buscaras dar la respuesta que Nemo dio.

1. ¿Qué pasa si Nemo se va con su madre?
- ¿Qué ocurre cuando conoce a Anna?
- ¿Qué pasa si confiesa su amor?
- ¿Qué pasa si no confiesa o si se mudan de país y se pierden?

2. ¿Qué pasa si Nemo se queda con su padre?
- ¿Qué sucede cuando conoce a Elise?
- ¿Qué pasa si se casa con ella?
- ¿Qué pasa si no lo hace?

3. ¿Qué pasa cuando conoce a Jeanne?
- ¿Cómo es la vida si se casa con ella?

4. ¿Qué pasa si Nemo no elige ni padre ni madre y se queda solo?
- ¿Cómo cambia su vida en soledad?
- ¿Se reinventa o vive una rutina gris?

Basado en las decisiones que tomaste debes realizar un **mapa de decisiones** mostrando cómo crees se ramifican estas distintas decisiones o consecuencias.

El efecto mariposa



Evan Treborn es un joven que sufre frecuentes lagunas mentales durante su infancia y adolescencia. Años después descubre que esas ausencias le permiten regresar al pasado y alterar lo que ocurrió en esos momentos de lagunas mentales. Con esta habilidad, intenta cambiar sucesos dolorosos que ocurrieron para mejorar la vida de quienes lo rodean.

Una de las personas más importantes en su historia es Kayleigh, su amiga de la infancia y su gran amor. Desde pequeños comparten experiencias traumáticas, marcadas por el abuso de su padre. Evan enfrenta el dilema de intervenir o no en esas situaciones, pues sabe que cualquier decisión puede cambiar drásticamente su futuro y el de Kayleigh: salvarla puede significar perderla en otras circunstancias, mientras que no hacer nada la condena a una vida marcada por el dolor.

Su otro gran vínculo es Lenny, su mejor amigo de la infancia, un chico tímido y vulnerable. Las decisiones de Evan también afectan profundamente la vida de Lenny. Cada vez que Evan altera un recuerdo, las vidas de Kayleigh, Lenny y él mismo se transforman.

En esta actividad deberás tratar de predecir cada decisión que tomó Evan, basándote en las preguntas y el resumen de la película que leíste buscaras dar la respuesta que Evan dio.

1. ¿Qué pasa si Evan interviene cuando el padre de Kayleigh abusa de ella?
    - ¿Qué consecuencias tiene en la vida de Kayleigh?
    - ¿Cómo cambia su relación con Evan?

2. ¿Qué ocurre si Evan se queda con Lenny en el accidente con dinamita?
    - ¿Y si se va y deja que Lenny cargue con la culpa?
    - ¿Cómo cambia la vida de Lenny después?

3. ¿Qué sucede si Evan mantiene su relación con Kayleigh?
    - ¿Y si se aleja para evitar el dolor?

4. ¿Qué pasa si Evan decide dejar de regresar al pasado y aceptar lo que sucedió?
    - ¿Cómo cambia la vida de todos los personajes?

Basado en las decisiones que tomaste debes realizar un **mapa de decisiones** mostrando como crees se ramifican estas distintas decisiones o consecuencias.

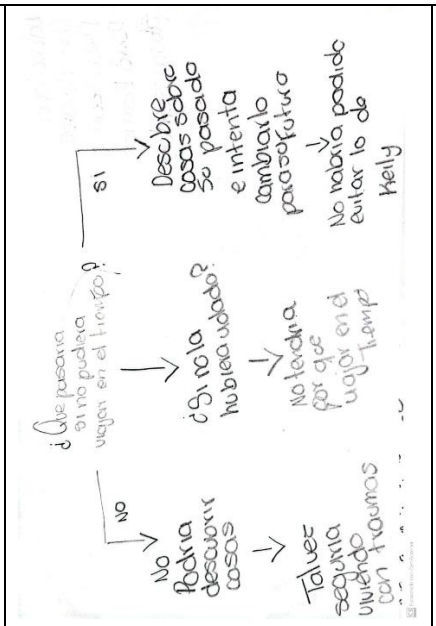
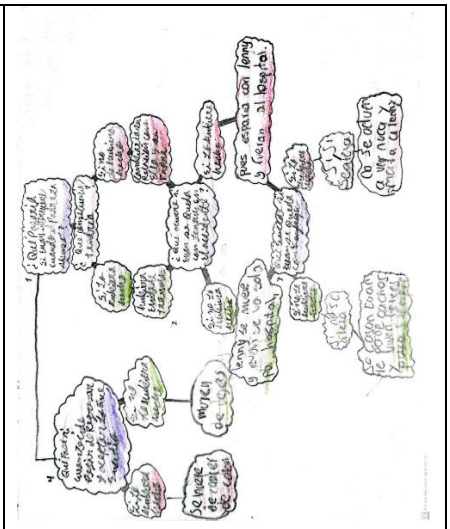
Anexo 5 Tabla de respuestas actividad inicial #1 de la secuencia de actividades #1

Actividad inicial #1 (escenas de películas)	***¿Creen que estos dos fragmentos de historias distintas tengan algo en común?***	***¿Una pequeña decisión podría cambiar el rumbo de nuestra vida?***
Respuestas de los estudiantes:	En que puede viajar al pasado, ¿no? Las decisiones del pasado que puedan afectar al futuro En que viaja en el tiempo La manera en la que se actúa en el pasado	Depende, porque puede tomar una decisión buena Si afecta porque al tomar una decisión tendré una consecuencia

Anexo 6 Tabla de respuestas actividad inicial #2 de la secuencia de actividades #1

Respuestas de la actividad (síntesis de la película el efecto mariposa)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
1. ¿Qué pasa si Evan interviene cuando el padre de Kayleigh abusa de ella? - ¿Qué consecuencias tiene en la vida de Kayleigh? - ¿Cómo cambia su relación con Evan?	Creo que si evan interviene en los abusos del padre de kayleigh esta podia vivir una vida mas normal sin la tristeza que le provocan los abusos de su padre y la relacion entre Evan y kayleigh siento que se aria mas fuerte ya que evan la ayudo a tener una vida mas feliz y tendrian mas confianza y cariño en su relacion	Nosotros creemos que le evitaria traumas para su vida 1.2 Cayo en las drogas y en la calle 1.3 Ellos se alejan	-Le hubiera evitado un trauma, y le tendria mas aprecio -muchas actitudes, relaciones y decisiones fueron a causa -de ese trauma, seria una persona completamente diferente
2. ¿Qué ocurre si Evan se queda con Lenny en el accidente con dinamita?	lo ayudaria a que este no quede metido en en accidente y lo salve de que este pueda morir o evitar que pueda perder alguna parte importante de su cuerpo ayudandolo a vivir una vida normal y a tener una relacion	El hubiera fallecido 2.1 Lenny se va del vecindario 2.3 se aleja de sus amigos	-Pues lenny no va estar por que estaban con la dinamita entonces evan es la que van interugar, - Pues si queda vida nunca mas confiaria en evans por que la traiciono

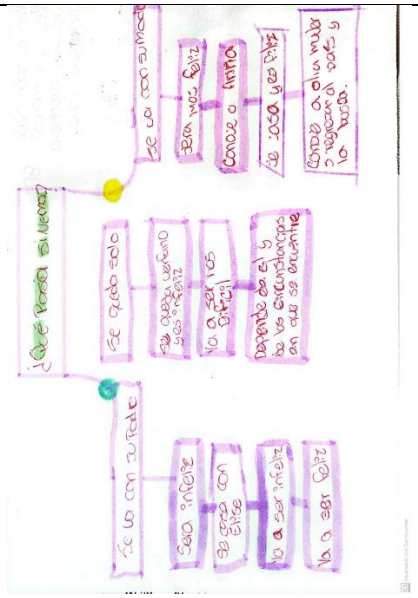
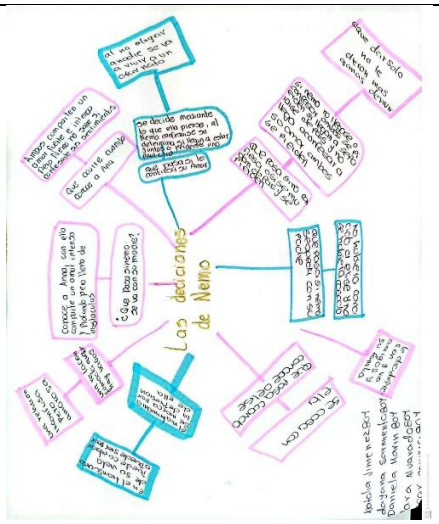
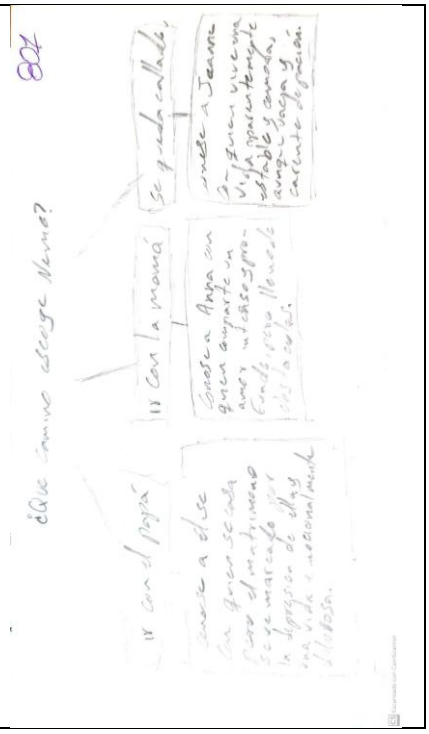
-Y si se va y deja que Lenny cargue con la culpa? - ¿Cómo cambia la vida de Lenny después?	aun mejor con mas confianza y amistad.		
3. ¿Qué sucede si Evan mantiene su relación con Kayleigh? - ¿Y si se aleja para evitar el dolor?	Talvez hubiesen formado una familia o vivido juntos y haci no separandose para seguir juntos y no se vengaran pero si se alejaran podrian seguir reencontrandose.	Se apoyan en su proceso 3.1 ¿Pero quien se aleja?	Pues en una parte beneficiaria a kayleigh para estar con su amante
4. ¿Qué pasa si Evan decide dejar de regresar al pasado y aceptar lo que sucedió? - ¿Cómo cambia la vida de todos los personajes?	tal vez todo salia bien y asi nadie le pasaria nada por no cambiar nada ya que si lo hicia entonces terminaba empeorando mas las cosas, talves los problemas actuales como la separacion o el arresto se solucionen.	La curiosidad no lo va a dejar y va a querer ir otra vez 4.1 Pues los personajes se enteran de cosas estando con el	Y todos se mueren por coney.

Mapa de decisiones			

Anexo 7 Tabla de respuestas actividad inicial #2 de la secuencia de actividades #1

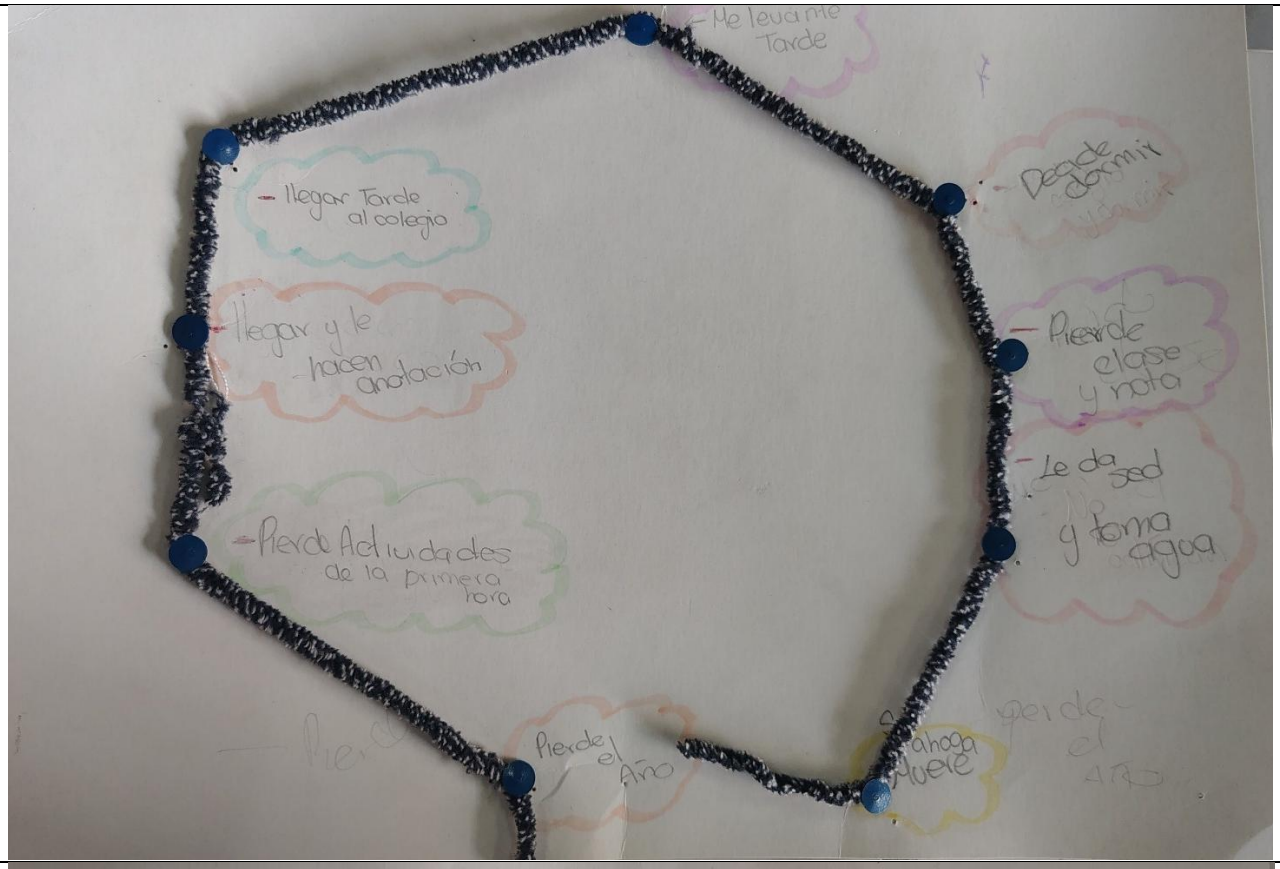
Respuestas de la actividad (síntesis de la película Mr. Nobody)	Grupo 1	Grupo 2	Grupo 3
1. ¿Qué pasa si Nemo se va con su madre? - ¿Qué ocurre cuando conoce a Anna? - ¿Qué pasa si confiesa su amor? - ¿Qué pasa si no confiesa o si se mudan de país y se pierden?	1. Será más feliz ya que con su - pareja conocerá personas que no lo harán feliz del todo. - Conoce a una mujer con la que se ve a futuro y la empieza a amar. -Se casa y pasa el resto de su vida con ella. - Conoce a otra mujer o vuelve al país y la busca.	-Conoce a Anna, con ella comparte un amor intenso y, aunque lleno de obstáculos -Ambos comparten un amor fuerte e intenso pero Memo no sabe cómo expresarles sus sentimientos porque a lo largo de la relación ha habido muchos obstáculos. -Se decide mediante lo que ella piense, al Memo compararse se determina si llegan a estar juntos o perderse uno para otro. -Si Nemo no llegase a confesar ambos se pierden, si llegan a separarse de país y no llega a confesar a su amor ambos se pierden.	1. Pues, cuando Nemo se va con su madre conoce a Ana que inicia a sentir un amor intenso y profundo 1.1 Inicia a sentir un amor intenso y profundo pero lleno de obstáculos 1.2 Si Nemo llega a confesar su amor a Ana puede que Ana lo acepte pero tendran un amor lleno de muchos obstáculos que deben enfrentar juntos 1.3 Pues si se mudan de país y se pierden puede que tengan una relación sin obstáculos y sin que nadie se oponga a su amor

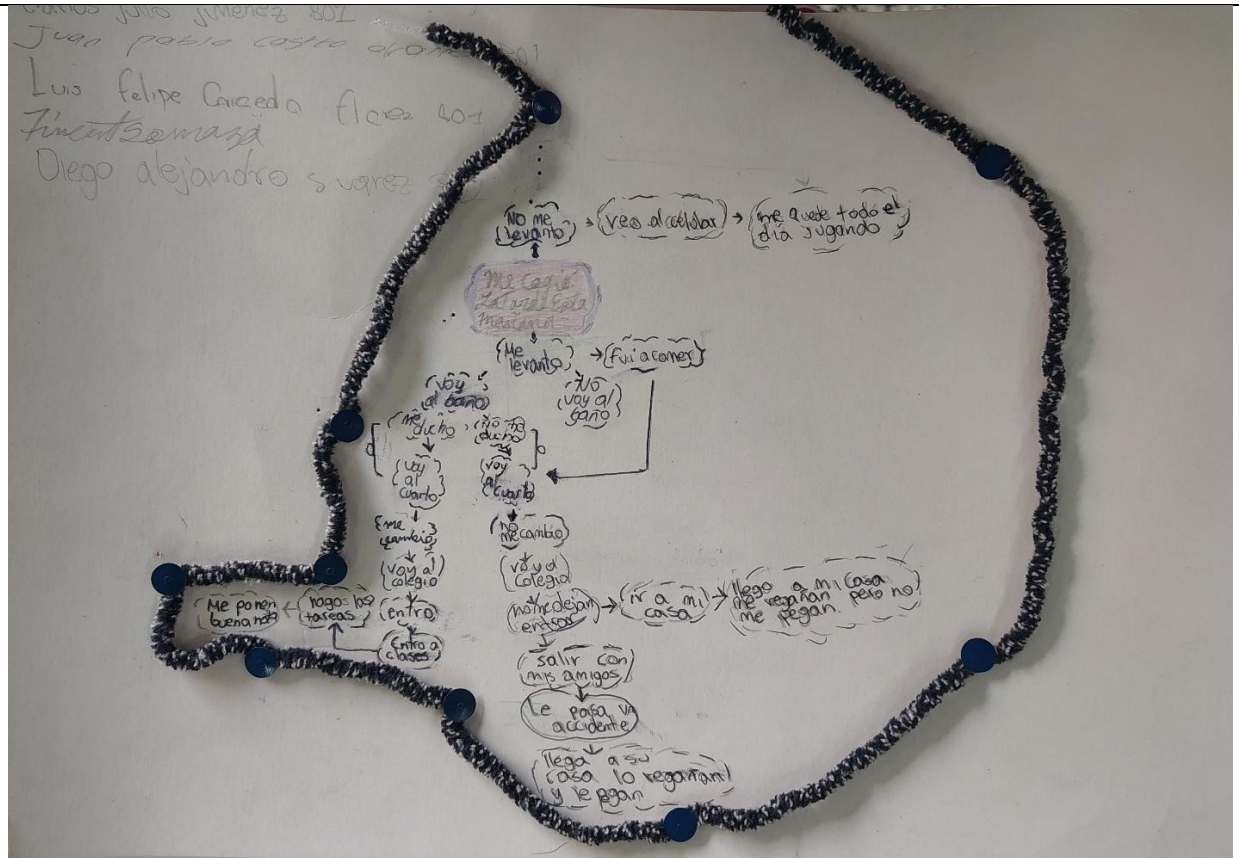
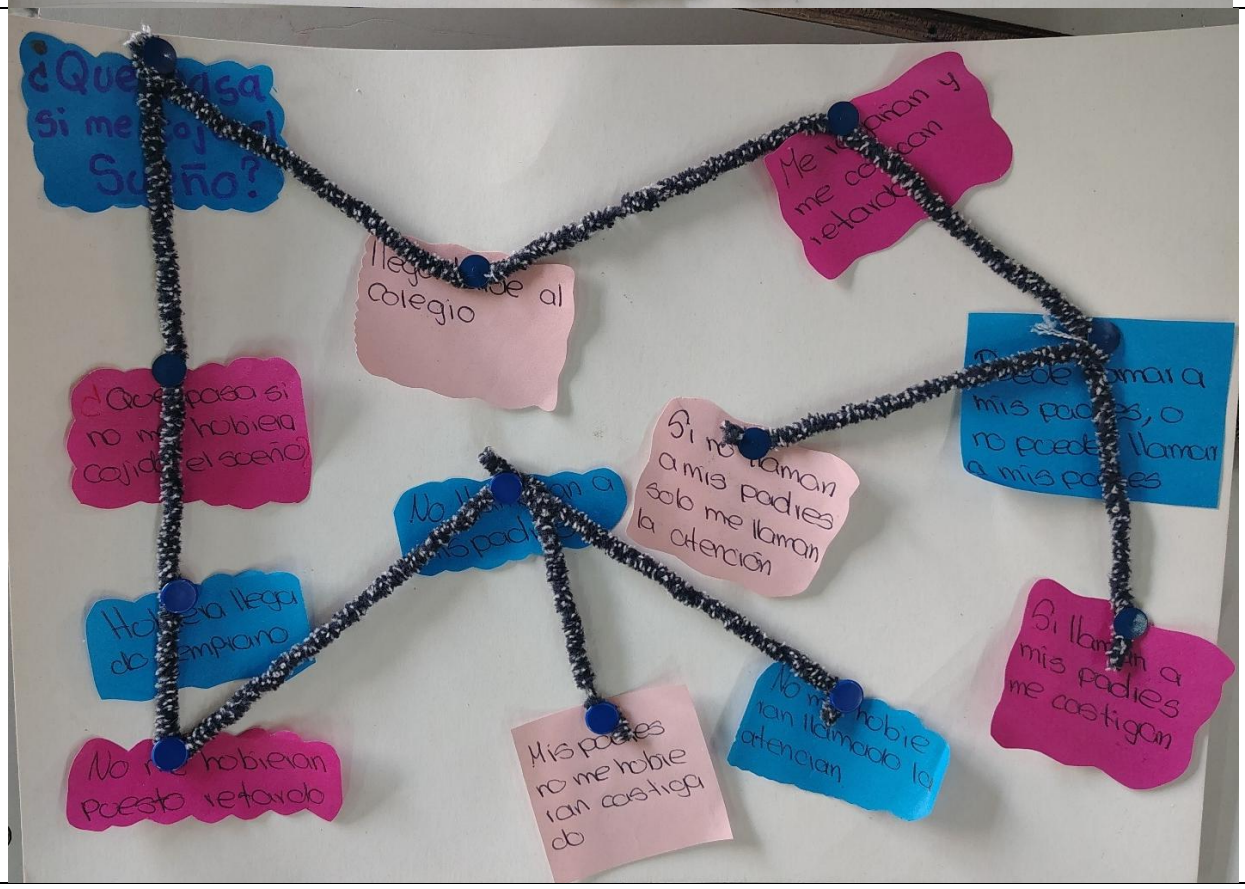
2. ¿Qué pasa si Nemo se queda con su padre? - ¿Qué sucede cuando conoce a Elise? - ¿Qué pasa si se casa con ella? - ¿Qué pasa si no lo hace?	2. será mas o menos infeliz ya que va a conocer personas que no lo harán avanzar o harán que su vida sea muy rutinaria. - Se conocen, se "enamoran" y se casan. -Va a ser infeliz, con una relación afectada por su esposa y su depresión y problemas emocionales. -Va a ser feliz y a experimentar cosas nuevas y conocerá a alguien mejor (tal vez).	- No habría conocido a Elise y no se hubiera casado. - Él se casa con ella. -El matrimonio se marca por la depresión de ella. -El transcurso de su vida puede cambiar, puede ser peor o cambiar.	2. Cuando Nemo se queda con su padre conoce a Elise con quien se casa, 2.1. Se casa con Elise, pero el matrimonio se ve marcado por la depresión de ella, 2.2. se ve marcado por la depresión de ella y una vida aparentemente estable y comoda, 2.3, vive una vida aparentemente estable y cómoda, aunque vacía y carente de pasión.
3. ¿Qué pasa cuando conoce a Jeanne? - ¿Cómo es la vida si se casa con ella?	3. Pues sintió una conexión que se fue desgastando con el tiempo. - Rutina, aburrido, sin emoción, romance, ni pasión.	- Cuando conoce a Jeanne estos tienen una relación estable y un poco cómoda a un que ambos se sienten vacíos y carecen de pasión. - Podría ser una relación confusa pero a la vez muy amorosa.	3. Cuando conoce a Jeanne vive una vida comoda y aparentemente estable. 3.1. Vive una vida aparentemente estable, pero vacía y carente de pasión.
4.. ¿Qué pasa si Nemo no elige ni padre ni madre y se queda solo? - ¿Cómo cambia su vida en soledad? - ¿Se reinventa o vive una rutina gris?	4.Se queda huérfano y es infeliz o no es infeliz y lo adoptan. -Va a ser más difícil y con más desafíos. -Depende de él y las circunstancias en las que se encuentre.	Memo al no elegir a nadie se va a vivir en un orfanato y cuando crece se va a vivir a la calle. Al Nemo quedar solo se mete en una depresión y soledad sin amigos ni familia. Al estar solo sin apoyo y sin ganas de vivir.	4. Conoce a Jeanne, con quien vive una vida aparentemente estable y cómoda, aunque vacía y carente de pasión 4.1. Pues una vida medio estable, nose xD 4.2. Se reinventa

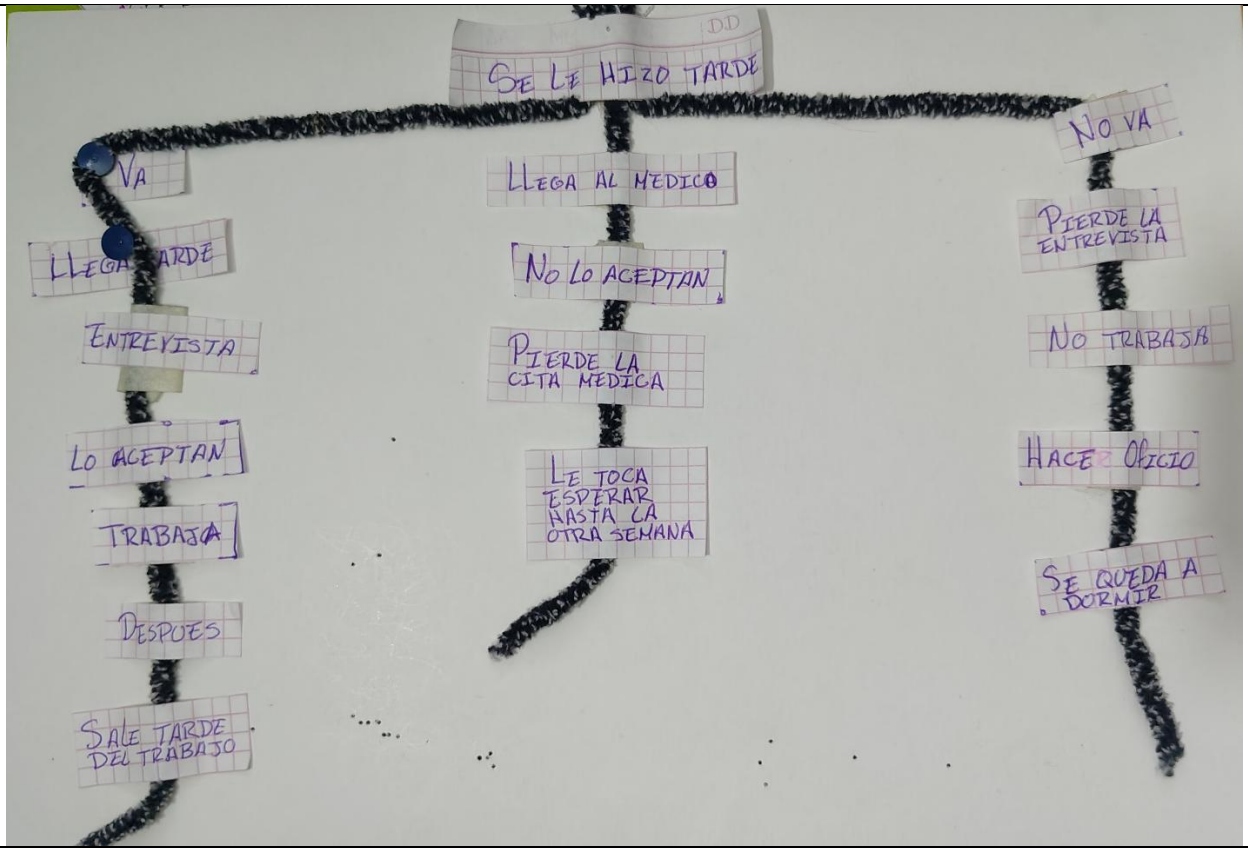
Mapa de decisiones			

Anexo 8 Tabla de respuestas Actividad #3 secuencia de actividades #1

Actividad de desarrollo #1	REDES DE LANA

Grupo 1	
Grupo 2	

Grupo 3	
Grupo 4	

Grupo 5	

Anexo 9 Tabla de respuestas Actividad #3 secuencia de actividades #1

	¿En qué se parece estos mapas que realizaron al efecto mariposa en la teoría del caos?	**¿En qué se parecen y en qué se diferencian estos mapas de las películas trabajadas?**	**¿Cómo se puede relacionar esta idea del mapa con los sistemas caóticos en la fisica?**	**¿El resultado final era predecible desde el inicio?**
Grupo 1	Tal vez tengan similitudes, pero no sin iguales, es que este nos muestra que pasaría si tomáramos diferentes decisiones, pero el efecto	En la toma de decisiones y como puede cambiar el futuro, o mas bien como el presente de esa persona, como eso puede afectar el futuro	Los sistemas caóticos no se pueden predecir tan fácilmente, esto tiene en común con el mapa que hicimos.	No, porque fue en el transcurso de que lo íbamos haciendo

	mariposa nos muestra varias opciones de esos distintos caminos, aquí en el mapa solo nos muestra un camino			
Grupo 2	Que una acción pequeña puede tener una gran consecuencia, y aparte de eso en cada una pueden elegir caminos.	La mariposa y el tema que tu habías dicho la clase pasada era del efecto mariposa, entonces por eso nosotros escogimos una mariposa, por el nombre de la película y porque la mariposa es lo del aleteo puede hacer un huracán.	Uno no puede predecir que la mariposa esté ahí, o por ejemplo al aletear o algo así se le rompa un ala o que tal pase un cuervo o algo y se la lleve o algo.	Si, porque empezamos con lo que pasaba al inicio y ya al respecto a eso se iba creando el resto.
Grupo 3	Si, porque algo tan pequeño como que no se bañe o que no se levante, algo así puede cambiar todo el transcurso y el final de la historia.	En las diferentes decisiones que uno toma va cambiando el transcurso de la historia y el final.	Que uno no sabría si se gana o no una buena nota, si porque de eso se trata la historia, sobre la nota, porque es sobre que el tipo va al colegio y pues no es predecible la nota que vaya a tener incluso aunque vaya al colegio no puede elegir, no es solo con que vaya al colegio, porque el puede	No, porque lo fuimos construyendo.

			elegir las tareas que hace y las que no	
Grupo 4	Pues yo creo que, si porque como ejemplo un aleteo de una mariposa tiene su proceso, entonces eso pasa acá, de cada problema el problema se puede ir subiendo para llegar a que te castigues o no suceda nada.	Pues que hay varios caminos depende de la opción que se tome o que pasa digamos que se pueden cambiar las cosas.	Que no son predecibles, pues todo empieza en estos dos, que pasa si me coge el sueño o si no me coge el sueño, depende de uno mismo, entonces es impredecible en este punto.	No, porque decimos que es como un proceso, primero dijimos ay este pongámoslo, y de esta idea se nos ocurrió otra idea, y así se nos ocurrió otras ideas que formaron estas.
Grupo 5	Por las consecuencias de nuestros actos, actuamos de una manera y rodo cambia de otra manera, a veces para bien o para mal, uno puede patear una piedra y esa piedra puede llegar a la calle y hacer que ocurra un accidente.	Esto tiene parecido porque aquí con cualquier cosita todo cambia, por ejemplo, si no vas puede pasar tal y tal cosa.	Que esto se puede medio predecir, los sistemas caóticos son sistemas que por así decirlo no se pueden predecir porque el mínimo cambio puede afectar todo, entonces este mapa si se puede predecir.	No, lo fuimos construyendo.

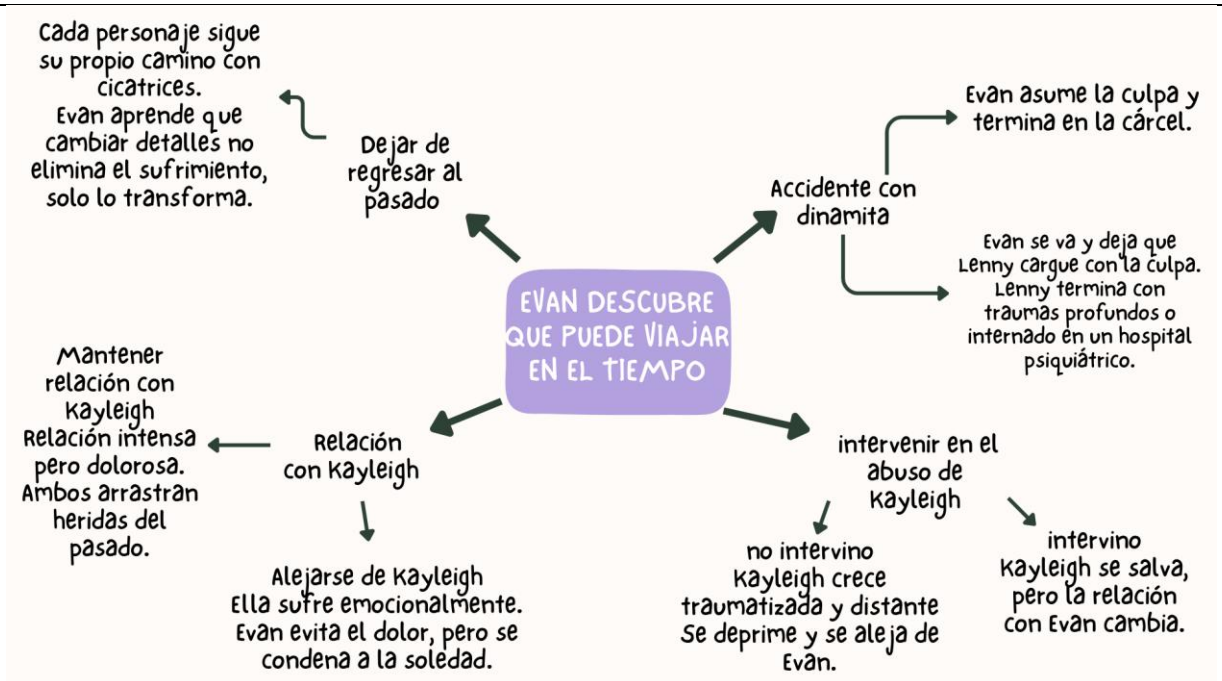
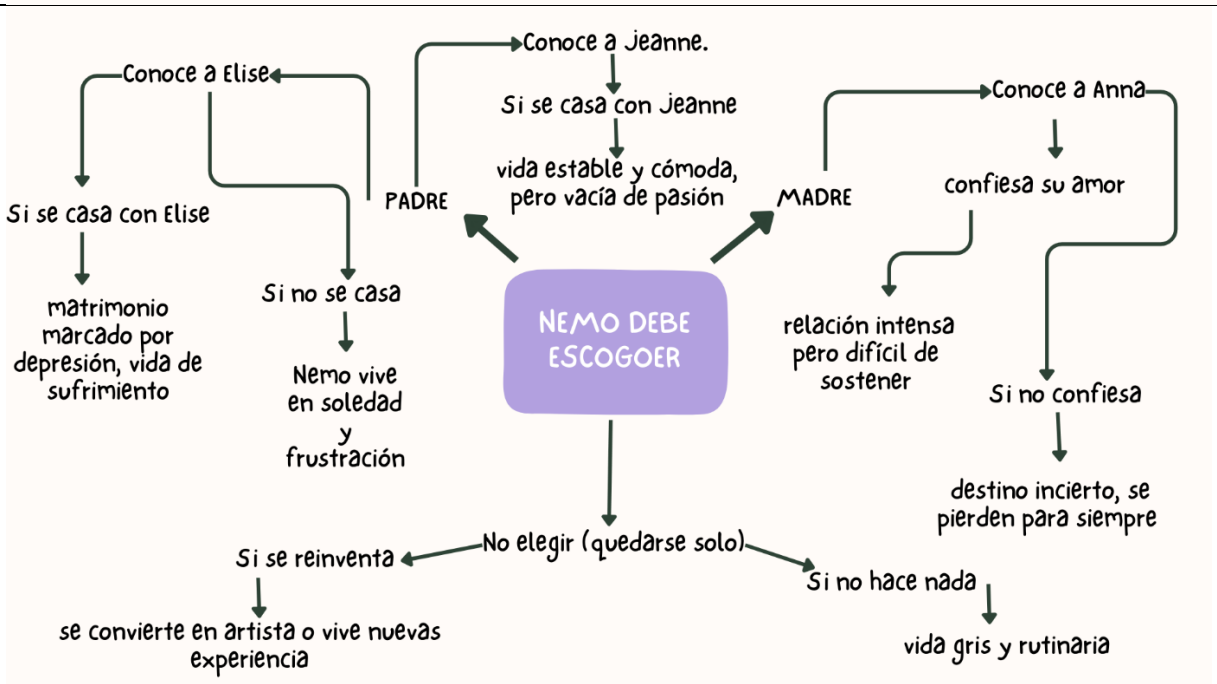
Anexo 10 tabla de respuestas Actividad # 4 cierre secuencia de actividades #1

	¿Que nos enseñan estas películas acerca de que tan predecible es el futuro?	**¿Es posible anticipar todo lo que ocurrirá como se pensaba en la fisica clásica, o el universo es**	**¿Qué aprendí sobre la importancia de las decisiones en la ciencia y en la vida?**	**¿Toda decisión me garantizara un único resultado?**

		más caótico de lo que imaginábamos?		
Grupo 1	Nos enseñan que no todo se puede predecir	El universo es más caótico de lo que imaginamos	Que son mas importantes y gracias a ellas todo puede cambiar	No
Grupo 2	No realizó la actividad	No realizó la actividad	No realizó la actividad	No realizó la actividad
Grupo 3	Nos enseñan que si tuviéramos conocimiento sobre todo lo que pasa en el mundo, podríamos predecir las cosas, pero en la practica es mas caótica.	Es mas caótica de lo que pensamos	Que es algo muy importante por que una sola decisión puede cambiar todo el resultado de el futuro nuestro.	Si porque no toda decisión tiene un mismo camino y final
Grupo 4	A no cometer los mismos errores sabiendo que va a pasar en el futuro.	Si porque la fisica clásica es que todo es predecible.	Que todas las deciciones pueden llevar un camino bueno o malo.	No porque todas las deciciones son diferentes entonces los resultados serian diferentes.
Grupo 5	Que hay mil y un opciones de lo que pueda pasar, nuestras decisiones del pasado afectaran el presente y el futuro	Eso es caotico ya que no hay nada fijo, todo varia y nada se salva de tener diferentes destinos, solo se pueden imaginar diferentes destinos, pero varios pueden ser mas aproximados a lo que va a pasar	Todo puede pasar en el futuro y se deben tomar las mejores decisiones posibles, adicional pensar y tener claro que puede algo simple salir mal y algo va a salir bien.	No ya que hay diferentes resultados y posibilidades se puede dar el resultado esperado como no se puede.

		(no se si me hago explicar)		

Anexo 11 Mapa de decisiones planteado por el docente para la actividad inicial #2

El efecto mariposa	
Mr. Nobody	

Anexo 12 Tabla de respuestas secuencia de actividades #2

Respuestas de los estudiantes de la comunidad de indagación
¿Creen que estos dos fragmentos de historias distintas tengan algo en común?
• Yo creo que se relacionan con las variaciones que hay en la vida. • Yo creo que se relacionan un poco con la compañera, acerca del fenómeno de causa y efecto • Pues la relación es con el efecto mariposa, porque era algo que él quería demostrar, pero no había pasado, Entonces volvió al pasado para hacer algo que causara algo en el futuro
¿Qué podemos ver en esta parte de la actividad, que representa esta metáfora?
• Conexiones • Caos • Decisiones • Caos en termino de una secuencia no lógica • No hay causa y efecto directa • El caos es algo que no entendemos
"me llevo la idea de que el efecto mariposa es…"
• Un efecto, de un cambio, nada es para siempre • La atención de la proximidad, todo lo que esta atrás no lo vemos • Lo mas importante es el hoy