



**LA EXPERIMENTACIÓN MENTAL EN LA CLASE DE FÍSICA: SU CONTRIBUCIÓN AL DESARROLLO DEL
PENSAMIENTO CRÍTICO Y A LA CONSTRUCCIÓN DE NOCIONES DE ESPACIO-TIEMPO RELATIVISTA**

WILMAR STIVEN MURILLO ARIAS

Licenciado en matemáticas y física

Trabajo de investigación presentado para optar al título de Magíster en Educación en Ciencias Naturales

Asesor Ángel Enrique Romero Chacón, Doctor (PhD) en Epistemología e Historia de las Ciencias y las
Técnicas

Universidad de Antioquia
Facultad de Educación
Maestría en Educación en Ciencias Naturales
Medellín, Antioquia, Colombia
2025

Cita	(Murillo Arias, 2025)
Referencia	Murillo Arias, W. S. (2025). La experimentación mental en la clase de física: Su contribución al desarrollo del pensamiento crítico y a la construcción de nociones de espacio-tiempo relativista [Tesis de maestría]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.
Estilo APA 7 (2024)	



Maestría en Educación en Ciencias Naturales, Cohorte V.

Grupo de Investigación Estudios Culturales sobre las Ciencias y su Enseñanza (ECCE).



Centro de Documentación Educación

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

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

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

Tabla de contenido

Resumen.....	11
Abstract	12
1 Planteamiento del problema y justificación.....	13
2 Objetivos.....	19
2.1 Objetivo general.....	19
2.2 Objetivos específicos.....	19
3 Antecedentes	20
4 Marco teórico	30
4.1 Pensamiento Crítico	30
4.1.1 La argumentación y la enseñanza de las ciencias	37
4.1.2 La argumentación y la enseñanza de las ciencias	41
4.2 Experimentación mental	45
4.2.1 El experimento mental como argumento	48
4.3 Concepción relativista del espacio-tiempo	54
4.3.1 El espacio-tiempo de Minkowski y el concepto de evento	65
4.3.2 Diagramas de espacio-tiempo de Minkowski	68
4.3.3 Construcción de las coordenadas espacio temporales de otro observador	71
5 Metodología	76
5.1 Paradigma investigativo y método de investigación	76
5.2 Contexto y participantes	78
5.3 Técnicas e instrumentos de registro de la información.....	79
5.4 Sistematización y análisis de la información.....	82
5.5 Criterios de credibilidad	86

5.6 Consideraciones éticas.....	87
6 Hallazgos.....	89
6.1 La experimentación mental como medio para la construcción de nociones sobre el espacio-tiempo.....	89
6.1.1 Rol de las representaciones geométricas en la significación de relaciones sobre el espacio-tiempo	89
6.1.2 Explicación, contrastación y traducción de experimentos mentales relativos al espacio-tiempo.	106
6.2 La experimentación mental como escenario para el desarrollo del pensamiento crítico a través de la argumentación	117
6.2.1. La experimentación mental como escenario para la revisión de perspectivas.	117
6.2.2 Experiencias imaginarias como mecanismo para un conocimiento autorregulado y reflexivo.	132
7 Conclusiones y Consideraciones finales	136
Referencias.....	141
Anexos	148
Propuesta pedagógica.....	148
Actividad de acercamiento: Diagrama de espacio-tiempo relativista	148
Actividad 2.....	150
Actividad 3.....	151
Actividad 4. Experimentación mental y su contribución al desarrollo de nociones relativistas parte 1	155
Actividad 4: Experimentación mental y su contribución al desarrollo de nociones relativistas. Parte 2	157
Actividad 5. Modelo de Debate Crítico	158
Transcripción Debate 1. Grupo de discusión	162
Transcripción Debate 2. Grupo de discusión	169
Guías de experimentación mental. Situación 1.....	175

Guías de experimentación mental. Situación 2.....	176
---	-----

Lista de tablas

Tabla 1. Matriz de categorías y subcategorías que representan los niveles de pensamiento crítico.....	23
Tabla 2. Etapas de implementación MDC	42
Tabla 3. Sistema de codificación.	82
Tabla 4. Simbología empleada en la transcripción.....	84
Tabla 5. Categorías y subcategorías de análisis con los indicios correspondientes.....	85
Tabla 6. Ejemplo de selección de algunas UA para la segunda categoría de análisis.	86
Tabla 7. Eventos nombrados E1, E2, E3, E4, E5 y E6, las cuales se representan con símbolos en Geogebra.	151
Tabla 8. Guía de experimentación mental	156
Tabla 9. Situación hipotética relativista.	157
Tabla 10. Transcripción Debate 1.....	162
Tabla 11. Transcripción Debate 2.....	169

Lista de figuras

Ilustración 1. Comparativa de los resultados del Pre-test y Post- en relación a las categorías y subcategorías que representan los niveles de pensamiento crítico.	24
Ilustración 2. Figura del Experimento Michelson-Morley publicado en su artículo "On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether" de 1887.	60
Ilustración 3. Experimento mental de Einstein: Caída de un rayo en dos lugares apartados entre sí A y B, además de un observador M equidistante de A y B.	64
Ilustración 4. Representación del espacio-tiempo desde una perspectiva geométrica elaborada por Minkowski.....	66
Ilustración 5. Representación bidimensional del espacio-tiempo de Minkowski.....	69
Ilustración 6. Eventos pasados y futuros dentro y fuera del cono de luz.	70
Ilustración 7. En el diagrama de espacio-tiempo a) se representa la línea de universo de un observador $O1$ que permanece en reposo, luego en b) se representa el diagrama de espacio-tiempo de $O1$ y otro observador $O2$ que rebasa a $O1$ con velocidad constante, por último, en c) se representa el diagrama de espacio-tiempo de un observador $O1$ con una mosca que da vueltas alrededor de él.	71
Ilustración 8. El eje del tiempo de un marco cuya velocidad es v	72
Ilustración 9. Luz reflejada en a , medida por O'	73
Ilustración 10. La reflexión en la figura 1.3, medida en O	74
Ilustración 11. Diagramas espacio temporales de O (izquierda) y O' (derecha)	75
Ilustración 12. Plan de recolección y organización de la información.	79
Ilustración 13. Diagrama de la línea de vida del participante PA.....	91
Ilustración 14. Diagrama de la línea de vida del participante PB.....	92
Ilustración 15. Diagrama de la línea de vida del participante PC.	93
Ilustración 16. Diagrama de la línea de vida del participante PE.	94
Ilustración 17. Diagrama de la línea de vida del participante PD.....	94
Ilustración 18. Representación de algunas situaciones físicas en un diagrama de espacio-tiempo.....	95
Ilustración 19. Situaciones físicas y representaciones previstas por el investigador.	96

<i>Ilustración 20. Representación de la situación “a” (línea de universo de una persona en reposo) dada por el grupo GP en un diagrama de espacio-tiempo.</i>	97
<i>Ilustración 21. Representación de la situación “a” (línea de universo de una persona en reposo) dada por el grupo GO en un diagrama de espacio-tiempo.....</i>	97
<i>Ilustración 22. Representación de la situación “b” dada por el grupo GO en un diagrama de espacio-tiempo.</i>	98
<i>Ilustración 23. Representación de la situación “c” dada por el grupo GO en un diagrama de espacio-tiempo</i>	99
<i>Ilustración 24. Representación de la situación “d” dada por el grupo GP ilustración a), y dada por el grupo GO, ilustración b) en un diagrama de espacio-tiempo.</i>	100
<i>Ilustración 25. Representación de la situación “e” dada por el grupo GP ilustración a), y dada por el grupo GO, ilustración b) en un diagrama de espacio-tiempo.</i>	101
Ilustración 26. A la derecha representación de la situación hipotética en un diagrama de espacio-tiempo relativista. A la izquierda se muestra la representación de los sucesos contemplados.	102
Ilustración 27. Respuestas a las preguntas frente a la simultaneidad de eventos, cuya escala vertical corresponde al número de participantes.....	103
Ilustración 28. Situación hipotética puesta en consideración para construir un experimento mental....	107
Ilustración 29. Diagramas de espacio tiempo contruídos por los participantes PB, PD y PC respectivamente.....	111
Ilustración 30. Situación hipotética (2) puesta en consideración para construir un experimento mentral.	112
Ilustración 31. Diagramas de espacio-tiempo contruídos por PA, PB y PC respectivamente.	115
Ilustración 32. Representación de la situación “a” (línea de universo de una persona en reposo) dada por el grupo GP en un diagrama de espacio-tiempo (al lado izquierdo) y la discusión alrededor del diagrama (al lado derecho).	118
Ilustración 33. Representación de la situación “b” dada por el grupo GO en un diagrama de espacio-tiempo (al lado izquierdo) y la interpretación del diagrama (al lado derecho).	120
Ilustración 34. Representación de la situación “b” dada por el grupo GP en un diagrama de espacio-tiempo.	121
Ilustración 35. Representación de la situación “c” dada por el grupo GP en un diagrama de espacio-tiempo (al lado izquierdo) y la interpretación del diagrama (al lado derecho).	122

<i>Ilustración 36. Representación de la situación “f” dada por el grupo GP (ilustración a), y representación dada por el grupo GO, (ilustración b) en un diagrama de espacio-tiempo.</i>	<i>123</i>
Ilustración 37. Situación hipotética puesta en consideración para el debate crítico.	125
Ilustración 38. Representación en un diagrama de espacio-tiempo de la situación favorable en donde el astronauta ganaría la apuesta.....	126
Ilustración 39. Representación en un diagrama de espacio-tiempo de la situación favorable en donde el viajero espacial ganaría la apuesta.	127
Ilustración 40. Representación en Geogebra de la situación imaginaria dada por el G.P que sustenta la victoria del astronauta.	130
Ilustración 41. Orden conceptual que se observa en la mayor parte de las actividades realizadas por los participantes del informe de investigación.	137
Ilustración 42. Diagrama de espacio-tiempo representado en un sistema de coordenadas de dos dimensiones.	148
Ilustración 43. Acercamiento de un diagrama de espacio tiempo-relativista.	149
Ilustración 44. Diagrama de espacio-tiempo relativista. El marco de referencia de Juan representado de color negro, y el marco de referencia de Rigo de color azul.....	152

Siglas, acrónimos y abreviaturas

ECCE	Estudios Culturales sobre las Ciencias y su Enseñanza
MDC	Modelo de debate crítico
MEN	Ministerio de Educación Nacional
TER	Teoría de la Relatividad Especial
UA	Unidad de análisis

Resumen

Este trabajo de investigación presenta los fundamentos teóricos y las contribuciones de una propuesta de enseñanza de la física para la educación media en Colombia, surgida en el programa de la Maestría en Educación en Ciencias Naturales de la Universidad de Antioquia (Medellín, Colombia) e inscrita en la perspectiva de investigación del grupo de Estudios Culturales sobre las Ciencias y su enseñanza- ECCE. Su propósito general fue analizar cómo la experimentación mental contribuye a articular el desarrollo de habilidades del pensamiento crítico y la construcción de nociones de espacio-tiempo relativista en estudiantes de física de nivel medio en Colombia. La investigación busca el desarrollo de estas habilidades a partir de la experimentación mental, planteando la posibilidad de que el estudiante adquiera una mirada crítica y reflexiva enriquecida por el uso de elementos narrativos y la representación geométrica del espacio-tiempo desde la perspectiva de Minkowski. La investigación se adelantó bajo el paradigma cualitativo con enfoque interpretativo, usando como método el estudio de caso instrumental. Los hallazgos evidencian que, la inserción de la experimentación mental en la clase física, promovió la creación de escenarios imaginativos provenientes de la experiencia y el entorno cotidiano del estudiante, que aterrizan el fenómeno físico a un lenguaje conocido por estos, promoviendo un intercambio de ideas significativo, en donde los estudiantes puedan respaldar sus experimentos mentales con razones y evidencias basadas en leyes físicas, con el objetivo de convencer a sus compañeros de sus posturas. Este ambiente de discusión fomentó no solo el desarrollo de habilidades críticas, sino también la construcción de un conocimiento físico del espacio-tiempo a nivel colaborativo.

Palabras clave: experimentación mental, pensamiento crítico, argumentación, flexibilidad de pensamiento, relatividad especial, espacio-tiempo de Minkowski.

Abstract

This research paper presents the theoretical foundations and contributions of a physics teaching proposal for secondary education in Colombia. This proposal emerged within the Master's program in Natural Sciences Education at the University of Antioquia (Medellín, Colombia) and is part of the research perspective of the Cultural Studies on Science and its Teaching (ECCE) group. Its general purpose was to analyze how mental experimentation contributes to the development of critical thinking skills and the construction of notions of relativistic space-time in secondary level physics students in Colombia. This research seeks to develop these skills through mental experimentation, raising the possibility of students acquiring a critical and reflective perspective enriched by the use of narrative elements and the geometric representation of space-time from a Minkowski perspective. The research was carried out under the qualitative paradigm with an interpretive approach, using the instrumental case study as a method. The findings show that the inclusion of thought experiments in physics classes promoted the creation of imaginative scenarios drawn from students' everyday experiences and environments. These scenarios ground physical phenomena in a language they understand. This fostered a meaningful exchange of ideas, allowing students to support their thought experiments with reasons and evidence based on physical laws, with the goal of convincing their peers of their position. This discussion environment fostered not only the development of critical thinking skills but also the construction of collaborative physical understanding of space-time.

Keywords: mental experimentation, critical thinking, argumentation, flexibility of thought, special relativity, Minkowski space-time.

1 Planteamiento del problema y justificación

El sistema educativo en Colombia en la Ley 115 de 1994 menciona la importancia del pensamiento crítico, reflexivo y analítico para el desarrollo científico y tecnológico de los futuros ciudadanos. El mundo contemporáneo requiere de prácticas educativas enfocadas en la construcción del conocimiento a través una mirada crítica de leyes, teorías o conceptos enseñados en el aula, además de una constante reflexión de las prácticas experimentales y su pertinencia para la enseñanza de las ciencias. En efecto, dentro de los lineamientos curriculares para el área de ciencias naturales y educación ambiental del MEN (1998), se amonesta al desarrollo de habilidades críticas en el contexto escolar, con el propósito de que los niños, niñas y adolescentes puedan adoptar una posición crítica a las mediciones experimentales o estimativas involucradas en una experimentación, y cómo estas responden a teorías y leyes científicas vistas en la clase de ciencias, siendo un indicador relativo al proceso de formación científica básica en el contexto escolar.

Adicionalmente, los lineamientos curriculares en ciencias atribuyen al pensamiento crítico-reflexivo como la capacidad de argumentar desde una perspectiva ética el papel que presenta la ciencia, la tecnología y su relación con la sociedad, y cómo estas contribuyen al progreso humano y la construcción de un conocimiento científico que es relevante en un contexto social y cultural. No obstante, autores como López (2013) y Fonseca (2019), afirman que los currículos escolares se han centrado en la adquisición de conocimientos por parte de los estudiantes en diversas disciplinas y no en cómo estos conocimientos pueden estimular el pensamiento para el desarrollo de habilidades críticas en el aula.

De acuerdo con Tamayo et al. (2015) uno de los problemas en la formación del pensamiento crítico en la educación en ciencias es la persistencia de centrar sus esfuerzos en la dimensión conceptual, dando importancia al aprendizaje de teorías, leyes y principios promoviendo un desarrollo de competencias en el ámbito conceptual, más que en “la apropiación crítica del conocimiento científico y a la generación de nuevas condiciones y mecanismos que promuevan la formación de actitudes hacia la ciencia y el conocimiento científico”(p.122).

Asimismo, Mackay et al. (2018) afirman la existencia de limitantes para la implementación del desarrollo del pensamiento crítico en la escuela, explicitando como causas las actitudes y expectativas del estudiante en relación al contenido a ser enseñado, la autoeficacia como la habilidad de confiar en criterios

propios y en recursos autónomos para la resolución de un problema y el poco conocimiento que presentan los docentes en cuanto a los niveles de razonamiento que deben adquirir los estudiantes para potenciar el pensamiento crítico.

Dentro del sistema educativo, la perspectiva instrumental en la enseñanza de las ciencias no ha permitido a los educandos trascender a habilidades de orden superior, tales como la argumentación y el pensamiento creativo, cuyas habilidades son fundamentales para la resolución de problemas en cada una de las diferentes disciplinas. La ausencia de estas habilidades lingüísticas y cognitivas en el aula implican direccionar la educación únicamente a la concepción de núcleos conceptuales de la ciencia, desligados de procesos críticos y reflexivos “donde juegan papel determinante la observación, la discusión racional, etc” (Tamayo et al; 2015, p.123).

En particular, en la enseñanza de la física en el contexto escolar se evidencia una inmutabilidad de pensamiento, a causa de la falta de diferentes enfoques que permitan explicar desde diversas perspectivas los fenómenos físicos acontecidos en el mundo natural, centrándose usualmente las prácticas de enseñanza en el desarrollo de conocimientos newtonianos para la explicación de los fenómenos relativos al movimiento de los cuerpos y sistemas. De acuerdo con Guayara (2017), en la educación colombiana hay una preponderancia en la enseñanza de la física clásica en relación a la física moderna, por lo cual los estudiantes no reconocen una independencia entre estas dos ramas de la física y en muchos contextos escolares no se presenta una perspectiva crítica de estas posturas. Adicionalmente, es evidente la ausencia de competencias, habilidades y perspectivas orientadas al desarrollo del pensamiento crítico en torno a la física moderna en los diferentes documentos oficiales del MEN (1998) y MEN (2004), a su vez, debido a su tiempo de elaboración, dichos documentos resultan ser atemporales a los contextos actuales del proceso educativo en nuestro país, lo que representa un obstáculo significativo para el desarrollo de propuestas investigativas en el campo de la enseñanza de la física moderna en la educación media. Asimismo, se observa una falta de actualización de los estándares básicos de competencias y de los lineamientos curriculares, lo que ha provocado que los currículos desarrollados en las instituciones educativas estén desactualizados. En consecuencia, los educandos reciben una formación en ciencias alejada de su realidad cotidiana.

En cuanto a la enseñanza de la física relativista, Pérez y Solves (2006) afirman la dificultad de modificar en los estudiantes explicaciones y perspectivas fundamentadas en la teoría mecanicista de Newton, que puede presentarse a través de prácticas experimentales de relativo acceso, comparado con concepciones relativistas de cuerpos que se mueven a velocidades próximas a la luz.

Según Pérez y Solves (2003), el estudio de la Teoría de la Relatividad de Einstein en las escuelas superiores ha sido un constante reto no solo para los estudiantes, sino también para los profesores de física, debido a la pregunta de qué tan relevante es cambiar la noción mecanicista de Newton (experimentalmente consistente) por una concepción del movimiento más completa, pero con poco sustento experimental en las aulas de clase. Para abordar esta dificultad, los autores proponen acercar a los estudiantes a los fundamentos históricos y epistemológicos que dieron lugar a un cambio en la concepción que se tenía del universo y discutir las inconsistencias que presentaba la ley de gravitación universal de Newton, por ejemplo, aquella de la precesión anómala de Mercurio. En este orden de consideraciones surgen preguntas como: ¿Qué estrategias pueden potenciar en la clase de física el desarrollo del pensamiento crítico y asimismo orientar la enseñanza de la física desde una mirada relativista?

Gamow (2013, como se citó en Pozo & Gómez, 2009) afirma que a partir de la niñez construimos conceptos de espacio, tiempo y movimiento que son interiorizados en nuestra estructura cognitiva, de tal forma que la mente se arraiga a las experiencias ordinarias de lo que conocemos, rechazando otras visiones del mundo que no correspondan a una visión conocida del mundo externo. Por lo cual, la enseñanza de la física moderna representa una reconfiguración cognitiva de lo que el estudiante conoce y percibe.

Por otra parte, acuerdo a Rodríguez & García (2000) el enfoque crítico reflexivo tiene como eje central la experiencia personal de los estudiantes, cuyo conocimiento es construido a través de experiencias subjetivas, la exploración de sus propias ideas y la confrontación de las mismas con sus compañeros. Este encuentro de pensamientos en el aula permite la apropiación de conceptos a través de la movilización de consensos.

Estos autores afirman la importancia del enfoque crítico-reflexivo en la transformación de las prácticas educativas en el aula, cuyos propósitos están encaminados en desarrollar habilidades de pensamiento, es decir, cuyo conocimiento enseñado *es organizado y evaluado por el pensamiento*, esto genera la posibilidad de construir el conocimiento a través de discusiones y reflexiones individuales y colectivas sobre el fenómeno estudiado.

Desde esta perspectiva, el educando de ciencias, al adquirir una mirada crítica del sistema físico estudiado, se despoja de la rigidez de pensamiento, evitando seguir las mismas prácticas para la resolución de un problema en la disciplina científica de ciencias naturales, adoptando así por su cuenta nuevos enfoques y miradas que le aportan en su desarrollo personal. De acuerdo con Zaldívar et al. (2005) la flexibilidad de pensamiento permite “el desarrollo de la subjetividad, de la necesidad de trabajar variantes como medio de realización personal” (p.2) y en términos generales estas variantes de ver un fenómeno de estudio permiten a los estudiantes tener diferentes visiones del mundo conforme al contexto en el cual se encuentra inmerso.

Complementariamente, de acuerdo con Peñaloza (2015), las hipótesis que un estudiante pueda presentar acerca del mundo resultan de un proceso colectivo de construcción del conocimiento y de cómo a través del tiempo estos procesos son transformados por las necesidades del contexto socio-cultural. Las diferentes visiones del mundo son construidas a través del intercambio de ideas y pensamientos en el aula, que condicionan al estudiante a tener diferentes posturas y generar cambios conforme a su realización personal.

Uno de los propósitos de la flexibilidad de pensamiento es la realización de una tarea enfocada en diferentes miradas de ejecución, procurando encontrar la estrategia adecuada que lleve a la solución esperada. Es importante precisar que el hecho de tener rigidez de pensamiento, o por el contrario flexibilidad, no depende del sujeto que aprende, sino de cómo se le enseña y cómo construye los significados de los contenidos disciplinares. Conforme a Zaldívar et al. (2005) “un hombre es rígido, en primer lugar, porque está condicionado histórico culturalmente que lo sea, y, en segundo lugar, porque se le educa intencional o casualmente para ello” (p.2).

De acuerdo con Escribano (2012), se logra evidenciar en las prácticas educativas orientadas en la educación media el interés de los estudiantes por conocer temáticas relacionadas con los fenómenos astronómicos, tales como el origen del universo, su expansión, sus límites espacio-temporales, la importancia de la especie humana en el universo, entre otros aspectos; cuestiones por las cuales el docente puede suplir estas necesidades inmediatas abordando los nuevos conocimientos científicos de la actualidad que dan respuesta a estas preguntas. Según Arriassecq et al. (2017), los hallazgos actuales en astrofísica y cosmología que son publicados en los diferentes medios de información, generan en los estudiantes una motivación por aprender estos temas en la clase de física. En efecto, Barrera et al. (2020) proponen una secuencia didáctica para tratar algunos conceptos de física moderna en la educación media colombiana, a través de los agujeros negros que fueron motivo de investigación a través de recursos audiovisuales y el análisis de la vida y obra de Stephen Hawking, reconocido como uno de los físicos más importantes en el estudio de la cosmología, particularmente de los agujeros negros.

Se considera en este proyecto, que satisfacer la demanda en la escuela en cuanto al conocimiento de formas más contemporáneas de concebir los fenómenos físicos, tal como la perspectiva espacio-temporal de la TER, que han sido relevantes no sólo para la comprensión del universo sino también para entender el funcionamiento de los sistemas tecnológicos actuales, permiten un mayor interés por el aprendizaje de las ciencias, al ser un conocimiento atrayente y alejado de las realidades que viven los educandos.

Otro aspecto a tener en cuenta para plantear la enseñanza de la física moderna en la educación media, son las visiones de mundo que el estudiante debe conocer acerca del universo que lo rodea y las diferentes teorías y leyes físicas que lo explican. De acuerdo con Heredia & Sánchez (2013) “es importante considerar la posición personal acerca de la naturaleza del conocimiento y cómo esta influye en su visión acerca del aprendizaje” (p.18), por lo cual el estudiante, decide cual perspectiva teórica se ajusta a su realidad.

Una alternativa para la enseñanza de la física moderna en el contexto escolar, consiste en el uso de los experimentos pensados o imaginarios, enfoque que plantea la posibilidad de desarrollar en el estudiante una mirada crítica y reflexiva enriquecida por el uso de elementos narrativos y la experiencia que le brinde el intercambio de ideas y pensamientos entre pares. Según Ruvalcaba et al. (2022) los experimentos pensados son modelos mentales, los cuales son construidos por elementos narrativos que

representan un sistema físico, condicionado por principios, leyes y modelos matemáticos que le proveen criterios de validez. El estudiante imagina un escenario e identifica unas variables que cambiarán conforme al escenario estudiado, formulando conclusiones o conjeturas.

Desde esta perspectiva, esta investigación propone el uso de la experimentación mental, con el fin de construir diferentes escenarios físicos posibles-regidos por la lógica, los cuales son analizados de acuerdo a leyes y principios establecidos en el mundo real. De acuerdo a Aguilar y Romero (2011) “el experimento mental es una acción de pensamiento donde se valoriza la experiencia conservada por el recuerdo y el lenguaje” (p.107).

Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones, relativas a las necesidades del sistema educativo en la búsqueda de estrategias de mejoramiento en la enseñanza de las ciencias, el presente informe de investigación propone la siguiente pregunta de investigación: ¿De qué manera la experimentación mental contribuye a articular el desarrollo de habilidades del pensamiento crítico y la construcción de nociones de espacio-tiempo relativista, en estudiantes de física de nivel medio?

2 Objetivos

2.1 Objetivo general

El objetivo general que se propone es:

Analizar cómo la experimentación mental contribuye a articular el desarrollo de habilidades del pensamiento crítico y la construcción de nociones de espacio-tiempo relativista en estudiantes de física de nivel medio.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las relaciones entre la experimentación mental y el desarrollo del pensamiento crítico en estudiantes de nivel medio, a partir de actividades argumentativas en torno a nociones del espacio-tiempo relativista, fundamentadas en el Modelo de Debate Crítico.
- Caracterizar las nociones sobre el espacio-tiempo relativista en estudiantes de nivel medio, cuando participan de una propuesta de enseñanza focalizada en actividades de experimentación mental.
- Describir los aportes de una propuesta de enseñanza, fundamentada en la experimentación mental, a la construcción de nociones del espacio-tiempo relativista y al desarrollo de habilidades argumentativas en estudiantes de nivel medio.

3 Antecedentes

Para la búsqueda y sistematización de los antecedentes del objeto de investigación, se adelantó un análisis documental, cuyo propósito es indagar por estudios realizados, empleando el método deductivo e inductivo de análisis propuesto por Hoyos (2000), método que propone las fases:

En la recolección de datos se procede inductivamente, de lo particular (unidad de análisis) a lo general (sistematización de datos) y en las tercera y cuarta fase (interpretación por núcleos temáticos y construcción teórica) se procede deductivamente, de lo universal a lo particular (p.57).

Para la recolección de los documentos se emplearon bases de datos tales como Google Scholar, Dialnet, Scielo, DOAJ y Scopus, utilizando como filtros de búsqueda: fecha de publicación (periodo comprendido entre el 2012 al 2022), títulos y palabras claves. se utilizaron como palabras clave: experimentación mental, pensamiento crítico, enseñanza de la relatividad especial en la educación básica y media, con sus respectivas traducciones al inglés y portugués, y relacionadas con los operadores booleanos AND y OR. Asimismo, se consultaron documentos de política pública, como los Estándares Básicos de Competencias y tesis de maestría sobre la temática de investigación. En total se recolectaron cuarenta (40) artículos de investigación, y veinte (20) tesis de maestría en la línea que se sitúa el presente informe.

En la etapa preparatoria de este análisis, posibilitó la constitución de dos núcleos temáticos: La Enseñanza de la Teoría de Relatividad Especial (TER), en su relación con el desarrollo del Pensamiento crítico, y la Experimentación mental, núcleos temáticos que se desarrollan a continuación a través de la descripción e interpretación de algunos de sus documentos correspondientes. Respecto al primer núcleo temático, la enseñanza de la TER en su relación con el desarrollo del pensamiento crítico, es relevante percatarse inicialmente que la enseñanza de la física moderna en el contexto de la educación básica y media es sin lugar a dudas una carencia marcada en los currículos escolares colombianos. Si bien, de acuerdo al MEN (1998) el sentido pedagógico de los lineamientos curriculares en ciencias naturales declara la importancia que el estudiante reconozca la historicidad evolutiva de las teorías y conceptos científicos y cómo éstos se han transformado dando paso a nuevos paradigmas científicos (que pone de manifiesto nuevos modelos y creencias que explican el universo y los fenómenos físicos), de acuerdo con autores

como Guayara (2019), Castañeda (2024) y Salgado et al. (2021) éstos fines no se traducen a la realidad de las escuelas colombianas, ya que no se enseñan las teorías modernas y contemporáneas que marcaron un hito en el pensamiento humano.

Estos autores afirman que, dentro de los indicios de cada ciclo educativo de educación básica y media, no se explicitan directamente aspectos de física moderna y tampoco se hace alusión a éstos. Si bien, en la educación colombiana, se instruye al cambio de visiones de mundo y a la flexibilidad de pensamiento, no existe aún un encuentro de miradas entre la física newtoniana desarrollada en el siglo *XIX* y la física contemporánea que es tema de conversación y de avances significativos en la actualidad.

Los autores afirman que, esta brecha entre la teoría (presentada en los lineamientos y estándares de competencias) y la práctica (la planeación y articulación de contenidos a ser enseñados en la escuela), se presenta a causa de una perspectiva lineal de la historia de las ciencias y su enseñanza, asumiéndose como un cúmulo de conocimientos que se construyen a lo largo del tiempo, pero no presentan una independencia, considerándose erróneamente la física moderna y contemporánea como la continuación de la física clásica del siglo *XIX*. En el contexto escolar colombiano, no se visibiliza una independencia entre estas dos ramas de la física y en muchos entornos educativos no se presenta una perspectiva crítica de estas posturas a causa de que la física moderna, y en el mayor de los casos, no está presente en el currículo.

Esto se pone en evidencia en las premisas del MEN (2004), las cuales afirman una visión lineal en la formación en ciencias cuyo conocimiento científico es el objetivo final tomando como partida las preconcepciones del mundo de los estudiantes y el cambio de visión de mundo a través de una postura crítica del conocimiento aprehendido, sin explicitar un cambio de paradigma entre un conocimiento científico propio de la época clásica y el conocimiento científico contemporáneo. Tomando en consideración lo anterior, Guayara (2019) afirma que “es importante plantear que la TER, no es una evolución de la mecánica clásica, sino que ella tiene sus propias bases” (p.19). De esta manera, se da apertura a que el docente construya estrategias que permitan: “analizar los procesos evolutivos del conocimiento científico a través del tiempo, o sea, su transformación histórica en la cual se dan los cambios o rupturas de paradigma” (MEN, 1998, p.50), dando una connotación diferencial de la física clásica a la física moderna y contemporánea.

En las investigaciones consultadas a nivel nacional, Guayara (2019) presenta un estudio documental acerca de la construcción de la noción espacio-tiempo desde una perspectiva de la relatividad especial y su enseñanza a estudiantes del grado séptimo en el Colegio Tomás Cipriano de Mosquera (Cundinamarca-Colombia), ahondando en aspectos históricos y epistemológicos desde una postura crítica. El propósito de la investigación consistió en realizar un proceso de indagación acerca de los estudios históricos de primera fuente referentes a las nociones de espacio-tiempo, partiendo desde su concepción para luego contextualizar dichas nociones de acuerdo a las necesidades actuales en la educación media. El autor del artículo asume la importancia de la concepción que se tiene del espacio tiempo para describir fenómenos físicos, además, muestra metodológicamente que las concepciones de espacio-tiempo realizadas por los estudiantes conforme a la época actual presentan cercanía con las nociones de los físicos que relativizaron el espacio tiempo en su época.

Las explicaciones en relación al espacio-tiempo construidas por los estudiantes se basaron en dos momentos; primeramente, la proyección del film: “Alicia a través del espejo”, que presenta una postura crítica en relación a las nociones de espacio-tiempo de la Europa del siglo XVII que fueron erradicadas posteriormente, adoptando los trabajos de Einstein por la comunidad científica. En un segundo momento se realizaron mediciones realizadas en zonas del colegio (el salón y la cancha), para las cuales se utilizaron instrumentos de medida no convencionales (zapatos, reglas y corbatas, además de pensarse medir con resortes), esto con el fin de realizar una serie de reflexiones en torno al uso de escalas rígidas para mediciones con fiabilidad.

Si bien las actividades propuestas por Guayara (2019) permiten acercar las nociones de espacio-tiempo a un lenguaje cercano y comprensible para su estudio a nivel secundario, se evidencia poca producción crítica y reflexiva de los estudiantes. Vale aclarar que los estudiantes representaron a modo de grafos imágenes del film a través de historietas y su perspectiva del espacio- tiempo conforme a su experiencia cotidiana; no obstante, no se evidencia una reflexión profunda y una postura crítica entorno a estas producciones. El autor del informe de investigación hace alusión a consensos realizados por los estudiantes, no obstante, no se indica cómo se llegó a tales fines y si verdaderamente los estudiantes adquirieron con la experiencia investigativa habilidades de pensamiento crítico.

Otros autores tales como Galvis (2019), plantean una unidad didáctica en el aprendizaje de la TER, para potenciar habilidades de pensamiento crítico en estudiantes de grado décimo de la Institución Educativa Antonia Santos (Córdoba-Colombia), cuyo instrumento empleado para la recolección de datos es el Pre-test como análisis de ideas previas y el Post-test como análisis posterior a la implementación de la unidad didáctica, esto con el fin de comparar los avances alcanzados en torno al desarrollo de habilidades de pensamiento crítico. El autor construye una matriz de categorías y subcategorías donde se ubicaban las respuestas brindadas por los estudiantes, con el fin de caracterizarlas de acuerdo a los niveles de pensamiento crítico planteados por Facione (2007): *Interpretación, análisis, inferencia, explicación, autorregulación y evaluación*. A cada respuesta se le asignaba una categoría y subcategoría (Véase tabla 1), siendo la categoría base la interpretación, mientras que la evaluación se asume como la máxima categoría de pensamiento crítico que podía alcanzar un estudiante.

Matriz de Identificación de categorías y sub-categorías

HABILIDADES DE PENSAMIENTO CRITICO																		
N.S	INTERPRETACIÓN	ANÁLISIS	INFERENCIA	EXPLICACIÓN	AUTO													
					RREGULACIÓN	EVALUACIÓN												
	Aclaración del sentido	Decodificación del significado	Categorización	Examinar las ideas	Detectar y analizar argumento	Cuestionar la evidencia	Proponer alternativas	Sacar conclusiones	Describir métodos y resultados	Justificar procedimientos	Proponer y defender razones	Presentar argumentos completos	Auto examen	Auto corrección	Reconocer confiabilidad in formación	Juzgar la conclusión de un argumento	Juzgar la fortaleza lógica del argumento	Juzgar la pertinencia de un argumento

De acuerdo con el autor, en el Pre-test se evidenció que el 44% de los estudiantes alcanzaron la categoría de interpretación (siendo la más baja), el 41% de los estudiantes no reconocen o no saben del

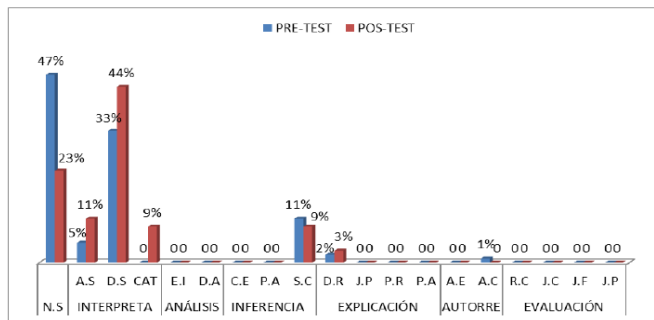
tema, mientras que el 15 % se ubica en las categorías de autorregulación, explicación, inferencia y análisis. Tras los resultados del Pre-test se evidencia la falta de habilidades de pensamiento crítico en los estudiantes y el poco manejo de conceptos físicos tales como: Caída libre, velocidad relativa, construcción de gráficas v-t, entre otros.

En el análisis diagnóstico realizado por el autor, se evidencia que los estudiantes presentan dificultades en resolver un problema de física clásica y construir gráficas de velocidad contra tiempo. Vale aclarar que, en el Pre-test el autor no realizó un ejercicio diagnóstico en aras de reconocer las nociones intuitivas que presentaban los estudiantes en cuanto a la noción de espacio-tiempo relativista.

De acuerdo con Galvis (2019), la unidad didáctica presenta tres fases, las cuales denomina: *nivelación de conceptos, precedentes históricos y desafíos de los autores*, donde en primera instancia se pretende que los estudiantes refuercen las temáticas de física clásica y su lenguaje matemático correspondiente, posteriormente se realiza un estudio del desarrollo histórico de la TER, y por último se presenta la indagación de los retos y dificultades que presentaron los autores tales como Albert Einstein en la construcción de la TER. El taller es empleado como técnica de recolección de datos.

El autor afirma que después de la aplicación del Post-Test, se evidenció un aumento en los niveles de pensamiento crítico, afirmando que en la categoría de interpretación los estudiantes pasaron a un nivel mayor; no obstante, también se evidencia la disminución de habilidades de inferencia. A continuación, se muestran los resultados comparativos entre el Pre-test y Post-test realizados en la investigación:

Ilustración 1. Comparativa de los resultados del Pre-test y Post- en relación a las categorías y subcategorías que representan los niveles de pensamiento crítico.



Fuente: (Galvis, 2019).

Si bien los test propuestos por Galvis (2019) indagan por el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico, la unidad didáctica propuesta para tales fines presenta una metodología tradicional de enseñanza, cuya implementación se centra en la instrucción de conceptos, leyes y teorías, y la resolución de problemas cuya evaluación de talleres se realiza a través de respuestas cerradas. Se hace prioridad al trabajo autónomo, hay poca participación de los estudiantes en conjunto y no se llega a consensos (criterio fundamental para alcanzar habilidades críticas); aspectos por los que se deja entrever el motivo por el cual no hubo un cambio significativo en los niveles de desarrollo del pensamiento, continuando en la categoría básica de interpretación, tanto en el pre-test como en el post-test.

Por otra parte, la autora Ascanio (2021) construye una propuesta didáctica realizada en una institución de la ciudad de Envigado (Antioquia), con el fin de llevar a los estudiantes del grado 10^o nociones relacionadas con la Teoría de la Relatividad, especialmente las del espacio-tiempo de Minkowski desde la cotidianidad y su influencia para el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico, para tales propósitos construye entrevistas semiestructuradas y preguntas cerradas de selección múltiple, en donde los estudiantes reflejaban su entendimiento acerca de nociones como espacio, tiempo, reposo y movimiento y cómo estos conceptos se hilaban para construir nociones relativistas. Adicionalmente, empleó textos visuales como historietas, en donde los estudiantes debían representar situaciones de la misma en diferentes marcos de referencia en un diagrama de espacio-tiempo relativista. La autora concluye que es posible llevar a la casa nociones relativistas sin una formación avanzada en física sin un tratamiento matemático complejo, adicionalmente concluye que, la discusión permanente entre los participantes del estudio refleja un desarrollo de habilidades críticas en el aula.

Autores como Otero et al. (2019) presentan una serie de secuencias didácticas diseñadas a partir de la teoría de campos conceptuales, realizada en un colegio de la ciudad de Medellín, enfocadas en la apropiación conceptual de la teoría de la simultaneidad para el grado once, cuyo eje central es el cambio conceptual de ideas pregalileanas del movimiento (simultaneidad absoluta) a concepciones relativistas modernas, donde un suceso o fenómeno físico ocurre en diferentes instantes de tiempo conforme al marco de referencia (inercial o no inercial) de un observador. Los autores emplean el taller como técnica de registro de datos, la implementación del mismo estuvo enmarcada en tres momentos: En primera instancia la lectura individual de situaciones de adición de velocidades y su interpretación galileana o

moderna, en segunda instancia la socialización en grupos de trabajo acerca de la situación planteada y su naturaleza clásica o relativista, por último, la resolución del problema de carácter individual.

Los autores dividieron los participantes en cuatro grupos diferenciados, con el propósito de socializar los sistemas de representación de cada estudiante y escoger a modo de consenso el acertado, para la resolución de cada problema de simultaneidad. En la investigación se emplean también categorías y subcategorías enfocadas en la identificación de nociones de simultaneidad tanto clásicas, como de la TER, por ejemplo: dos cuerpos llegan al mismo tiempo o en tiempos diferenciados hacia un extremo de un vagón en movimiento.

La investigación realizada por los autores a nivel de apropiación conceptual es acertada, debido a que en cada situación diseñada para cada secuencia es un enlace de aprendizaje para responder a la siguiente, esto con el propósito de generar rupturas conceptuales en lo aprendido en mecánica clásica cuando se abordan situaciones propiamente de la TER. Por ejemplo, como lo afirma el autor, el uso de situaciones físicas en donde la adición de velocidades de Galileo es coherente, mientras que en situaciones posteriores (con velocidades cercanas a la luz) no es permisible, permite en los estudiantes una ruptura conceptual, que eventualmente facilita el ingreso a la TER. Esta situación se pudo evidenciar en la investigación gracias al encuentro de ideas y a los consensos generados en los grupos de trabajo, en donde a través de la discusión grupal, los estudiantes generaban argumentos para responder a situaciones físicas que ponían en entredicho la simultaneidad entre eventos.

Otros autores como Castañeda et al. (2024), analizaron cómo se ha incorporado la enseñanza de la relatividad general en la educación básica y media en Colombia, a través de una revisión sistemática de artículos científicos nacionales e internacionales entre los años 2012 y 2022 suministrados mediante bases de datos como Web of Science, Scopus y Dialnet en relación a propuestas de enseñanza de la TER en estos niveles de educación. Los autores identificaron que hay una preferencia por un estudio cualitativo de aspectos concernientes a la relatividad general tales como el espacio-tiempo curvo, los agujeros negros y ondas gravitacionales, este abordaje cualitativo es debido a que se espera que el tratamiento matemático complejo de la relatividad no sea un impedimento para abordar estos conceptos en educación básica y media, además se amonesta a que se introduzca la TER en edades tempranas para el desarrollo de un entendimiento más profundo en años posteriores.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, puede afirmarse que, a nivel general, en Colombia se evidencian pocas investigaciones que tengan relevancia en cuanto a la enseñanza de la TER en su relación con el desarrollo del pensamiento crítico, y las que se han realizado no han generado un mayor impacto en la escuela, ya sea por una implementación de carácter instrumental en las unidades didácticas propuestas o por la ausencia de secuencias que garanticen la movilización de consensos y la construcción social de conocimientos.

En las investigaciones consultadas a nivel internacional, Arriaseccq et al. (2015) diseñan una secuencia de enseñanza aprendizaje (SEA) con el fin de indagar por las dificultades de docentes y estudiantes de educación de nivel media en la enseñanza de la relatividad especial de Einstein, además de realizar una investigación exhaustiva por los libros de textos que se utilizan para tales fines. Se emplea un número estructurado de etapas que propenden analizar, desde un punto de vista histórico y epistemológico, los hechos de gran relevancia en la construcción de la TER y la forma correcta de evaluarlos en el aula de clase. Se emplean una serie de applets que permitirían posteriormente acercar los conceptos necesarios para su comprensión, tales como la noción de simultaneidad, la curvatura del espacio tiempo, diagramas de Minkowsky, entre otros; llegando a la conclusión que el uso de Applets como herramienta didáctica en la enseñanza de la TER, facilitaron su comprensión y aumentaron el interés del alumnado.

Por otro lado, autores como Prado et al. (2020) realizaron una revisión bibliográfica mediante bases de datos como Web of Science, Scopus, Educational Resources Information Center y Google Scholar acerca de la problemática en cuanto a la enseñanza de la relatividad especial desde la mirada del profesorado, tomando en consideración las propuestas didácticas diseñadas para su enseñanza en estudiantes de nivel secundario. Observaron que, dentro de las dificultades del profesorado es recurrente encontrar el pensamiento erróneo de que el desarrollo de la teoría de la relatividad trata procesos extremos de velocidad o energía (ceranos a la velocidad de la luz) y que por ende es mejor descartarlos, debido a que se alejan de la cotidianidad. Argumento que es inverosímil debido a que la teoría de la relatividad tiene aplicaciones y resultados prácticos en la vida diaria. Asimismo, la preconcepción de la construcción de la relatividad en el peso de Einstein, dejando de lado los avances realizados en este campo por otros científicos. De igual forma las confusiones presentadas por el profesorado en cuanto al concepto

de evento y simultaneidad, en donde se piensa erróneamente que los eventos son simultáneos para un observador pero no para otro, estando incluso en iguales sistemas de referencia.

En lo concerniente al núcleo temático de Experimentación mental, se encuentra que este se ha convertido en un instrumento metodológico para la modelización en la enseñanza de las ciencias naturales; un claro ejemplo de ello su utilización en la construcción de significados de fenómenos físicos. Oliva et al. (2021) trabajaron la resolución de problemas cualitativos a partir de la experimentación mental como medio para acercar nociones de conservación de masa a los estudiantes de Educación Secundaria Obligatoria (2° y 3° grado de la ESO). La implementación se realizó en dos colegios en el contexto urbano; como problema planteado se estudia si verdaderamente la masa de la tierra varía conforme al paso del tiempo, a lo que los estudiantes debían construir modelos pensados en los cuales argumentaran su aprobación, desaprobación o un cambio despreciable de la masa de la tierra para, posteriormente a través de la interacción social permitir el consenso de cuál modelo pensado se ajusta más a la realidad.

El artículo concluye que la negociación de las ideas en grupo permitió la transformación de un modelo pensado (construcción individual) a un modelo compartido (construido a partir del consenso). La experimentación mental y la interacción social en clase aportó argumentos más elaborados y próximos al conocimiento científico, aportando a la construcción de nociones de conservación de la masa.

Autores como Ruvalcaba et al. (2022) han investigado la experimentación mental como instrumento metodológico para indagar por el conocimiento de contenido en profesores de física a nivel secundario y las ideas alternativas que presentan conforme a su formación disciplinar. Los autores emplean la entrevista a modo de *pensar en voz alta* para reconocer las representaciones mentales que construyen los profesores en torno al experimento de Galileo sobre la caída de los cuerpos. El artículo concluye que, a partir de los experimentos pensados se facilitó analizar diferentes dimensiones del conocimiento de contenido de docentes tales como la epistemológica y cognitiva a partir de las narrativas que iban construyendo de sus representaciones mentales del fenómeno de caída de los cuerpos.

La búsqueda de antecedentes aporta a la presente investigación un panorama de los estudios que se han realizado en relación al desarrollo de habilidades de pensamiento crítico, además de cómo se han construido secuencias didácticas que permitan el estudio de la TER en la educación básica y media tanto

en Colombia como a nivel internacional. Se identifican pocos avances significativos en cuanto a la implementación de contenidos relacionados a la física moderna en el currículo escolar, además de estrategias que promuevan habilidades argumentativas, la flexibilidad de pensamiento y las visiones de mundo que es menester reconocer en el proceso de alfabetización científica en las clases de física.

4 Marco teórico

En el presente capítulo se realiza una fundamentación conceptual fundamentada en los tres núcleos temáticos que articulan el informe investigativo, los cuales son: la experimentación mental, el pensamiento crítico, además de señalar la argumentación como estrategia para el desarrollo de habilidades críticas y por último, la enseñanza del espacio-tiempo relativista que fue el contenido disciplinar el cual fue objeto de análisis durante la investigación. En primera instancia, el pensamiento crítico se abordó como una habilidad cognitiva aplicada para el análisis, evaluación y la toma de decisiones con responsabilidad cognitiva, según lo planteado por autores tales como Lipman (2003), Boisvert (2004) y Leitão (2012), esta última haciendo hincapié en las prácticas argumentativas como medio para pensar críticamente. En segundo lugar, la experimentación mental se presenta como una forma de experimentación mediada por el pensamiento y la argumentación siguiendo los aportes de Kuhn (1982), Mach (1948), Mettini (2020), Norton (1991), entre otros. Finalmente, la enseñanza del espacio-tiempo relativista se enmarca en estrategias pedagógicas con el objetivo de facilitar su comprensión a través de la experimentación mental como instrumento metodológico. Para comprender conceptualmente el estudio de la relatividad, particularmente en la descripción de fenómenos de espacio-tiempo se consultan autores como Minkowski (2012), Levrinin (2000), Einstein (1998) entre otros.

4.1 Pensamiento Crítico

Ante la urgencia de promover en la enseñanza de las ciencias un pensamiento crítico para el análisis, evaluación y explicación de los fenómenos científicos en aras de resolver problemas de manera lógica y racional con sentido de transformar y tomar conciencia de las maneras de pensar y de vivir en sociedad, se han recopilado aportes de diferentes autores que abordan el pensamiento crítico y las habilidades necesarias para su desarrollo, los cuales permitieron un horizonte conceptual que fundamentó el presente trabajo de investigación.

Conforme a los Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales del MEN (2004) que buscan contribuir al desarrollo de un pensamiento crítico y un pensamiento científico en la educación escolar, la formación en ciencias es un proceso de indagación e investigación que fomenta la construcción de nuevos significados a través de un juicio crítico y razonado, en el cual la actividad científica promueva

un encuentro de ideas y reflexiones que favorezcan la identificación de problemas y la búsqueda de diferentes alternativas de solución. Adicionalmente, la práctica científica genera espacios de reflexión que permiten el debate de asuntos controversiales y una evaluación orientada desde un análisis crítico, en donde la evaluación se convierta en un proceso de revisión de perspectivas, a través del uso de las preconcepciones de los y las estudiantes y su modificación progresiva a procesos cognitivos mucho más elaborados a través de la argumentación y el encuentro entre pares.

Dentro de los lineamientos curriculares en ciencias naturales y educación ambiental (1998), se prioriza en la construcción humana de la ciencia, con el objetivo de presentar una enseñanza de las ciencias, basada en la constitución de múltiples visiones o perspectivas de mundo, en la cual el estudiante pueda conversar, no sólo con sus concepciones, sino también, con las demás posibilidades que los demás presentan, de tal forma que la mirada de un educando le sea permitido “descentrarse al situarse en otras perspectivas entendibles para él y vea desde ellas la relatividad de sus convencimientos en busca de un conocimiento más objetivo o, lo que es equivalente, un conocimiento más intersubjetivo” (p.8).

Conforme a lo anterior, la Fundación Omar Dengo (2014) afirma que las competencias de aprendizaje para el siglo XXI¹, se basan en orientar las prácticas de enseñanza en un nuevo conocimiento en interacción con otros. Una de las competencias denominada *maneras de pensar*, se desarrolla a través del pensamiento crítico² como una habilidad de orden superior que se propicia brindándole a los

¹ La Fundación Omar Dengo (2014) define las competencias del siglo XXI como un conjunto de “destrezas, conocimientos y actitudes necesarios para enfrentar exitosamente los retos de esta época, y que nos invitan a reformular nuestras principales aspiraciones en materia de aprendizaje y a hacerlas más relevantes para esta nueva era” (p.11). Dichas competencias se dividen en las siguientes categorías: 1. *Maneras de vivir el mundo*, que se evidencian a través de conocimientos referentes a la ciudadanía local y global, vida y carrera, además de la responsabilidad personal y social. 2. *Maneras de pensar*, que incluyen como habilidades la creatividad e innovación, la resolución de problemas, aprender a aprender y el pensamiento crítico. 3. *Herramientas para trabajar*, que incluyen como destrezas el manejo de la información y la apropiación de las tecnologías digitales, y 4. *Maneras de trabajar*, que incluyen como actitudes la colaboración y la comunicación.

² Es importante efectuar una clasificación de las habilidades de pensamiento para situar el pensamiento crítico en relación a otras habilidades. Romano (1995, como se citó en Boisvert, 2004) afirma que hay tres tipos de habilidades de pensamiento: *Habilidades básicas*, las cuales establecen los cimientos de los procesos del pensamiento relacionados con la información que permiten predecir, inferir, clasificar, analizar, entre otras. *Las estrategias de pensamiento*, que son las operaciones en conjunto que se efectúan en secuencia, tales como la toma de decisiones, la resolución de problemas, el pensamiento crítico, entre otras. Y por último las habilidades metacognitivas que dirigen y controlan las habilidades básicas y las estrategias del pensamiento a través del ejercicio de planear, evaluar y vigilar los procesos de pensamiento del individuo.

educandos oportunidades e instrumentos para producir criterios propios, además de tomar decisiones razonadas dentro del aula y en otros entornos de aprendizaje. Dichos instrumentos pueden ser: 1. La incorporación de momentos de reflexión y análisis a través de la exploración de diferentes puntos de vista referente a una temática en particular y 2. La creación de ambientes en donde se promueva la escucha, el encuentro de buenas razones y la valoración de las opiniones de los demás.

La adquisición o la constitución del pensamiento crítico ha sido objeto de estudio y discusión en diversas disciplinas: Desde la filosofía como forma de pensamiento, a través del estudio de la lógica formal e informal del conocimiento, hasta disciplinas orientadas en la educación como la pedagogía y psicología, que han centrado sus esfuerzos en estudiar los procesos cognitivos, sociales y culturales que permiten el desarrollo de prácticas de enseñanza que generen aprendizajes significativos en diferentes entornos de aprendizaje, además de la inclusión en el currículo escolar de estrategias y metodologías que permitan el desarrollo del pensamiento crítico en el aula. A continuación, se muestran algunas posturas de autores que hacen referencia al pensamiento crítico.

Desde una perspectiva filosófica, Paul & Elder (2005) proponen un enfoque del pensamiento crítico que se define como el proceso de analizar y evaluar el pensamiento con el propósito de mejorarlo paulatinamente, a través del reconocimiento de estructuras elementales del pensamiento y los estándares intelectuales más elementales para pensar. De acuerdo con los autores, cuando se promueven habilidades de pensamiento crítico, es necesario diferenciar rasgos mentales que los estudiantes van adecuando con el tiempo. Se distingue entonces de un pensador hábil pero sofista (que cae en generalizaciones y en razonamientos enmascarados “pareciendo ser verdaderos”) y de un pensador hábil e imparcial, los cuales son intelectualmente humildes y empáticos, mostrando rasgos de autonomía y criterio intelectual características propias de pensar críticamente. “Es posible desarrollar algunas habilidades de pensamiento crítico dentro de uno o más contenidos, sin desarrollar habilidades de pensamiento crítico en general (...) de modo que los estudiantes aprendan a razonar bien en una amplia gama de sujetos y dominios” (p.7).

Los autores también afirman que en la educación se establece una relación de tipo condicional (el *qué* de la educación que deriva en el *cómo*), denominado el “*qué*” de la educación como el contenido deseado a ser asimilado por los estudiantes y el “*cómo*” de la educación, que es el proceso por el cual el estudiante se apropia de ese conocimiento de forma significativa. Muchos docentes consideran

erróneamente que tan sólo exponiendo el qué de la educación al alumnado, éstos pueden encontrar de forma autónoma las estrategias o el cómo adecuado. Sin embargo, en la práctica, esto no ocurre. Por esto se requiere de la generación de estrategias que permitan al docente identificar un trabajo intelectual en los estudiantes a la vez que se tenga una propuesta de cómo es el funcionamiento de la mente cuando los estudiantes son intelectualmente comprometidos. En términos generales, los autores definen el pensamiento crítico como un conjunto de habilidades y disposiciones intelectuales que son desarrolladas por el pensamiento, donde se genera el descubrimiento y procesamiento de la información que conlleve a pensar para llegar a conclusiones, examinar suposiciones, aceptar contradicciones del pensamiento, resolución de problemas y su transferencia a diferentes contextos (Paul & Elder, 2005).

Desde un enfoque sociopolítico, Freire (2012) en el libro titulado “Pedagogía del oprimido” define el pensamiento crítico como una habilidad desarrollada a través de una educación liberadora y con conciencia social, que rompa las cadenas de una educación basada en la transmisión de conocimientos que fomenta la pasividad y la represión, cuyo propósito es educar bajo la premisa de dominación o la gobernanza del estado sobre el individuo. Este enfoque sociopolítico del pensamiento crítico, pretende en su discurso empoderar a los oprimidos a través de acciones transformadoras que influyan sobre la realidad a través de un diálogo crítico y liberador, que haga parte de las prácticas educativas en contextos formales e informales.

Desde un enfoque cognitivo, Swartz (2011) relaciona el pensamiento crítico con un pensamiento hábil y razonado, presentando una serie de habilidades cognitivas que un estudiante debe adquirir para el desarrollo del pensamiento crítico a través de la acción de cultivar hábitos de pensamiento y su capacidad de razonar adecuadamente. Para ello emplea un Modelo de Aprendizaje Basado en el Pensamiento, cuya premisa es fortalecer una serie de habilidades que permitan a los estudiantes tener un pensamiento hábil o crítico. Estas habilidades son: Generación de ideas (a través de analogías, personificaciones y recursos metafóricos que permitan acercar al alumno al conocimiento estudiado), ideas aclaradoras (que incluye el análisis de ideas a través de la comparación y contrastación de ideas, analizar argumentos a través del encuentro de razones y conclusiones) y por último la evaluación de la razonabilidad de las ideas (a través de la fiabilidad de las fuentes, uso de evidencias, entre otras).

Por otra parte, Facione (2007) define el pensamiento crítico como un proceso de evaluación del pensamiento para el mejoramiento en la calidad en la toma de decisiones. Para estos propósitos el autor afirma la importancia de desarrollar *habilidades cognitivas*, tales como: el análisis (con el objetivo de expresar juicios de valor y creencias), la interpretación (que hace alusión a la comprensión de un significado), la autorregulación (autoevaluación de las experiencias y creencias propias), la inferencia (encaminada a la formulación de conjeturas e hipótesis), explicación (presentación de resultados de manera coherente) y evaluación (que hace alusión a la valoración de juicios de valor y creencias).

Por último, desde un enfoque socioconstructivista, Vygotsky (2009) en su libro “el desarrollo de los procesos psicológicos superiores” afirma la importancia del lenguaje interpersonal e intrapersonal para los procesos de aprendizaje de orden superior desde una perspectiva crítica del conocimiento, en el cual la interacción social permite examinar la base de los argumentos contruidos por el niño, en donde la comunicación entre pares permite la evaluación de los propios pensamientos y la apropiación de otras estructuras de pensamiento.

Otra de las corrientes de pensamiento crítico en educación, la cual se asumirá como fundamento teórico para la presente investigación es la concepción desarrollada por Mathew Lipman (2003) y Boisvert (2004) según la cual se define el pensamiento crítico como “un pensamiento que 1) facilite el juicio porque 2) se basa en criterios, 3) es autocorrectivo y 4) es sensible al contexto” (Lipman, 2003, p.212). A continuación, se presentan cada uno de los cuatro elementos que integran esta definición.

Los juicios son el resultado del pensamiento crítico. Lipman (2003) define el juicio como “la formación de opiniones, estimaciones o conclusiones. Por lo tanto, incluye cosas tales como resolver problemas, tomar decisiones y aprender nuevos conceptos” (p.211); no obstante, como afirma el autor, el hecho de tipificarse como un acto de “buen juicio” es un producto ejecutado por instrumentos y procedimientos adecuados que den respuesta a una situación problema ligada a un sujeto pensante. Desde este punto de vista, el pensamiento crítico no es sólo un proceso, sino un pensamiento aplicado, que tiene como finalidad desarrollar un producto debido a una interpretación responsable (i.e., que posea sentido).

El pensamiento crítico se apoya en criterios. De acuerdo con Boisvert (2004), los criterios son “las razones en las que se apoyan los juicios” (p.37), permitiendo que éstos estén fundamentados en bases sólidas. Asimismo, Lipman (2003) define los criterios como “reglas o principios que permiten la elaboración de juicios” (p.212), dando credibilidad y objetividad a las opiniones y a la toma de decisiones. En este mismo sentido, Boisvert señala que todas las áreas de conocimiento aplicadas están orientadas a una serie de criterios que permiten una “responsabilidad cognitiva”, cuyo objetivo es expresar argumentos con racionalidad, respetando los principios, convenciones y leyes que rigen una disciplina científica. El pensamiento crítico y los criterios se encuentran estrechamente relacionados, retroalimentándose uno del otro, como lo afirma Lipman (2003):

El pensamiento crítico es un pensamiento fiable, y las habilidades en sí mismas no pueden definirse sin criterios por medio de los cuales puedan evaluarse actuaciones supuestamente hábiles. Entonces el pensamiento crítico es un pensamiento confiable que emplea criterios y puede evaluarse apelando a los criterios (p.213).

Así de acuerdo con el autor, el desarrollo del pensamiento en los estudiantes de escuela depende en gran medida en cómo justifica y defiende sus argumentos. Entre mayor sean las bases que fundamentan sus argumentos a través de criterios bien fundamentados, mayor será la capacidad de aceptación de las opiniones que se expresan y, en consecuencia, el pensamiento crítico es responsabilidad cognitiva.

El pensamiento crítico es autocorrectivo. Este elemento hace referencia a la capacidad de corregir la forma de pensar, al encontrar debilidades y rectificarlas, siendo esta una característica más del pensamiento crítico. Tal como lo enuncia Boisvert (2004), “Una buena parte del acto de pensar se desarrolla de una manera no crítica, de modo asociativo, sin preocuparse por la validez, es importante por tanto reflexionar en la forma de pensar para rectificar métodos y procedimientos” (p. 38).

El pensamiento crítico muestra sensibilidad al contexto. Boisvert (2004) afirma que “el pensamiento crítico permite tener en cuenta las circunstancias particulares en el momento de la aplicación de reglas a casos concretos o en el de pasar de la teoría a la práctica” (p.38), cuyo sujeto responsable de realizar ciertos juicios de valor presenta un discurso propio, conforme al contexto en el cual se pone de manifiesto, y éste es tenido en cuenta en la veracidad y coherencia de sus argumentos. Asimismo, Lipman

(2003) afirma que el pensamiento crítico se relaciona estrechamente con la lógica informal, teniendo en cuenta el razonamiento inferencial que no presenta conclusiones con veracidad absoluta, sino meramente probables: “El lógico informal se esfuerza por identificar las muchas falacias a las que es propenso el pensamiento, e identificar también aquellos casos individuales que son falaces” (Lipman, 1991, p. 220). Así, la sensibilidad al contexto implica tener en cuenta las irregularidades (errores conceptuales), limitaciones y el discurso global en el cual se exponen los argumentos.

Complementariamente, de acuerdo con Boisvert (2004), la formación del pensamiento crítico en los alumnos necesita de una serie de habilidades cognitivas, las cuales son: las habilidades de búsqueda, razonamiento, organización de la formación y habilidades relacionadas con la traducción. A continuación, se describe cada una de estas áreas cognitivas:

Habilidades de búsqueda: Corresponde a una práctica autocorrectiva donde se juzgan los medios convenientes para estudiar un problema, la curiosidad motiva a reconocer las hipótesis y determinar vínculos. A través de ella, los niños y jóvenes aprenden a explicar, predecir, distinguir causalidades de efectos, además de plantear y analizar problemas.

Razonamiento: La razón permite ampliar el conocimiento sin la necesidad de vivir las experiencias suplementarias; como lo afirma Lipman (1995, como se citó en Boisvert, 2004), “al partir de lo que se conoce, razonar permite descubrir las cosas suplementarias que se pueden añadir” (p.39), atendiendo a los criterios que fundamentan los juicios de valor que realiza el sujeto.

Organizar la información: Si se desea adquirir un conocimiento eficaz es importante organizar la información de forma coherente y relevante conforme al objeto estudiado. Con el fin de generar un juicio de valor acertado de la información; como menciona Boisvert (2004) “al relacionar los conceptos se establecen los principios y criterios, y se formulan argumentos y explicaciones” (p. 39). La información debe organizarse de tal forma que sea comprensible para ser analizada desde una mirada crítica.

Habilidades relacionadas con la traducción: La habilidad de traducción hace referencia al cambio en la transmisión de un significado, ya sea cambiando de un idioma a otro, o de un sistema simbólico. Por ejemplo, el hecho de cambiar el uso de elementos narrativos a modelos mentales para dar solución a un

problema requiere de habilidades de traducción, que implica cambiar la representación utilizada, pero conservando el sentido de lo que se desea transmitir.

En este orden de consideraciones, pensar críticamente es consecuencia de prácticas argumentativas que permitan una “buena selección de fuentes de información que incentiven el debate y la crítica. Si el debate se encuentra implícito en los textos compartidos con los estudiantes, esto facilitará que asuman posturas desde distintas perspectivas, incluso que se pongan en el lugar del otro” (p.126). El pensamiento crítico no sólo permite la construcción del conocimiento científico en la clase de ciencias, sino también el desarrollo de competencias comunicativas que le permitirán apropiarse de los contenidos a través de la defensa y revisión de perspectivas contrarias, aspectos que pueden desarrollarse a través de prácticas argumentativas en el aula, que son fundamentales para la enseñanza de las ciencias.

4.1.1 La argumentación y la enseñanza de las ciencias

Desde un punto de vista sociocultural en la enseñanza de las ciencias, el aprendizaje no sólo está mediado por la teoría y la experimentación como fuentes en la construcción del conocimiento científico, sino también en una alfabetización científica que contribuya a “la superación de dogmatismos y certezas, que incentive la reflexión, la crítica y la autonomía intelectual” (Romero et al; 2013, p.24). Desde esta dimensión sociocultural de las ciencias, las experiencias humanas son de gran relevancia en la construcción de significados, cuyo eje central es el encuentro de opiniones, creencias y supuestos propiciando la argumentación y cultivando diferentes formas de ver el mundo en la clase de ciencias.

En este sentido, la enseñanza de las ciencias se ha transformado en un espacio de reflexión que permite la flexibilidad de pensamiento y el reconocimiento de intereses y necesidades de los estudiantes, cuyo eje central es la *razonabilidad*, entendida por Toulmin (1977) como una disposición al cambio, al aceptar críticamente otros puntos de vista a partir de las negociaciones y experiencias discursivas que se establecen en sociedad; para tales fines, se entiende la educación en ciencias desde una perspectiva toulminiana como un proceso de enculturación, donde se hace necesario que los estudiantes logren apropiarse de una serie de criterios de selección (principios, leyes y teorías) propios de un legado cultural, con el fin de comprender una disciplina científica y tener una perspectiva crítica de la misma.

Una de las habilidades a ser cultivadas en la clase de ciencias es la *argumentación* entendida como la “externalización de los razonamientos” (Romero et al; 2013, p.31) cuya finalidad es la aceptación, validación y el cambio de ideas o creencias, que son contruidos a través de un conjunto de significados propios de un acervo cultural. En ese mismo sentido la enseñanza de las ciencias tanto en la formación de profesores como en el ámbito escolar, es un espacio donde se fomenta la formación de un pensamiento crítico y reflexivo donde se posibilita el consenso y el disenso.

Autores como Romero et al. (2013) afirman la importancia de la argumentación para el desarrollo del pensamiento crítico, donde a través del diálogo social se construyan diferentes puntos de vista y explicaciones que puedan ser apoyadas o refutadas, generando consensos que permitan la construcción de conocimiento en el aula de ciencias.

Los autores afirman que el ejercicio argumentativo requiere de una serie de condiciones que promuevan su producción en el aula, tales como: 1) la intervención de todos los estudiantes en el proceso dialógico, siendo éstos mismos productores de su conocimiento, 2) el rol del profesor en promover la participación y concertar los criterios en los cuales se construyen y se evalúan los argumentos, haciendo partícipes a los estudiantes de la evaluación del proceso, 3) la metacognición como ejercicio de pensar lo pensado en cuanto a la construcción propia del conocimiento, teniendo una perspectiva crítica de la evaluación y los avances obtenidos en el proceso y 4) la comunicación que se basa en el aprendizaje colaborativo, en el cual el conocimiento es una construcción social mediada por la argumentación.

Conforme a las condiciones anteriormente mencionadas que promueven el ejercicio argumentativo en el aula, surge el siguiente interrogante: ¿cómo desarrollar el pensamiento crítico en las prácticas dialógicas en el aula de ciencias?

Para Leitão (2012) el pensamiento crítico depende de un reconocimiento de los diferentes puntos de vista desde los cuales se puede abordar un problema, por consiguiente, se desarrolla en interacción con el otro, siendo su objetivo principal confrontar perspectivas divergentes desde una perspectiva dialógica y dialéctica.

La autora pretende conceptualizar la argumentación como una actividad cognitivo-discursiva que no sólo promueve acciones pedagógicas que apuntan al desarrollo del pensamiento crítico, sino también a la apropiación de conocimientos en diferentes campos del saber. Según la autora, la argumentación tiene lugar en la medida en que un grupo de individuos exponen sus puntos de vista, formulando razones que las respalden permitiendo la valoración de perspectivas contrarias, con el propósito de reconocer la solidez tanto de los argumentos propios como de los ajenos. Esta confrontación entre perspectivas subyace de la dimensión dialógica y dialéctica de la argumentación, en la cual, el intercambio de ideas mediado por el lenguaje permite la elaboración de discursos que son a su vez construcciones del diálogo entre individuos, promoviendo así una construcción del conocimiento a través de un encuentro permanente en sociedad.

En este sentido, Leitao (2009) caracteriza la argumentación como una actividad discursiva (desde un intercambio verbal), como una actividad social (de connotación cultural), cognitiva (de razonamiento y valoración crítica de puntos de vista), dialógica (de interacción entre pares, persuasión y negociación de significados), dialéctica (evaluación de perspectivas contrarias desde una postura crítica) y epistémica (referente a la construcción del conocimiento). La autora hace hincapié en la naturaleza epistémica de la argumentación, afirmando que ésta presenta un potencial para la construcción del conocimiento, que depende del carácter dialógico-dialéctico, es decir, de los movimientos discursivos generados alrededor de una discusión o situación controvertida y a la evaluación de puntos de vista contrarios. Además, depende de aspectos cognitivos, que hacen referencia a los procesos mentales que implican la construcción, evaluación y revisión de argumentos. Leitao (2012) propone dos niveles de argumentación, que son objeto de estudio desde una perspectiva teórica y empírica los cuales son:

La argumentación entendida como un proceso de revisión de perspectivas, desde un plano cognitivo, que es objeto de estudio sobre el contenido de conocimiento, atendiendo a juicios de valor, conceptos, creencias e hipótesis que los individuos construyen acerca de objetos y fenómenos ya sea en el mundo físico o de índole social. De acuerdo con la autora, la revisión de perspectivas es un proceso de carácter epistémico, que promueve la transformación en las perspectivas de los individuos que les permite construir e interpretar la realidad, entendidas como formas de conocimiento. El hecho de responder ante una posición contrapuesta implica confrontar posiciones, acoger o rechazar la opinión del otro, todo dentro de un marco de razonabilidad (de disposición al cambio).

Conforme a lo señalado por la autora, si bien la confrontación con una oposición no garantiza una transformación del argumento inicial, es un punto de partida para hacer una revisión de la fuerza o fragilidad de los argumentos, que promueva una evolución en cuanto a la comprensión del fenómeno estudiado. Además, este proceso de revisión de perspectivas conlleva al desarrollo de la habilidad crítica denominada *flexibilidad de pensamiento*. El oponente cuando presente un argumento inicial, tendrá que prestar atención al contenido de sus afirmaciones que son oposición a su proponente y evaluar hasta qué punto sus afirmaciones pueden resistir a una oposición, o si por el contrario estos deben ser modificados o inclusive abandonados (Leitao, 2012).

La flexibilidad de pensamiento, como una de las habilidades del pensamiento crítico mediada por la argumentación, es definida por la autora como la capacidad del individuo para reconocer diferentes puntos de vista que permitan solucionar un problema para ser abordados en diferentes situaciones, lo cual conduce a una consideración y evaluación de ideas contrarias para abordar críticamente una situación problema.

La argumentación entendida como un proceso de pensamiento autorregulado, de acuerdo con Leitao (2012) esta es una habilidad metacognitiva, la cual se basa en la reflexión por parte del individuo acerca de los límites (debilidades) de sus propios argumentos, encaminada a la regulación de los procesos de pensamiento de carácter individual y su aprendizaje durante este proceso. Autores como Facione (2007), afirman que esta habilidad de pensamiento, permiten:

Monitoreo auto consciente de las actividades cognitivas propias, de los elementos utilizados en esas actividades, y de los resultados obtenidos, aplicando particularmente habilidades de análisis y de evaluación a los juicios inferenciales propios, con la idea de cuestionar, confirmar, validar, o corregir el razonamiento o los resultados propios (p. 6).

Los dos niveles antes expuestos se caracterizan por partir del plano cognitivo al metacognitivo, pasando de conocer el mundo (formular puntos de vista sobre diversos temas) a reflexionar sobre el conocimiento que se tiene del mundo (apoyar o responder a la oposición). La relevancia de estas reflexiones permite la construcción y apropiación crítica del conocimiento en ambientes de enseñanza-aprendizaje.

4.1.2 La argumentación y la enseñanza de las ciencias

De acuerdo con Leitão (2012), ante la necesidad de encontrar estrategias para trabajar la argumentación en el aula, se presenta como alternativa la implementación del debate como un recurso pedagógico, que promueve principalmente acciones para el desarrollo del pensamiento crítico y reflexivo, además del mejoramiento en la enseñanza y aprendizaje de contenidos específicos en un contexto escolar. La autora afirma que, independiente de los diferentes formatos que existen de debate pedagógico, se debe priorizar el impacto que estos tienen sobre el funcionamiento cognitivo-discursivo de los participantes y en las perspectivas teóricas en las cuales éstos se basan. Es usual la implementación del debate pedagógico tradicional en el aula, siendo una actividad interactiva, abierta al público, que promueve el intercambio de ideas a través de la exposición, defensa y refutación de puntos de vista contrarios. Este tipo de interacción social genera habilidades como la escucha activa, reflexión y articulación rápida de respuestas en cada una de las partes, además de la toma concertada de decisiones.

Autores como Chávez y fuentes (2010) afirman que el debate promueve una producción cooperativa de conocimiento, en donde el aprendizaje deja de ser un proceso de mecanización objetivo e inmutable y pasa a convertirse en una práctica del diario vivir que promueva una co-construcción del conocimiento a través de un intercambio simbólico y “una negociación dialógica de sentidos y visiones o apuestas de mundo” (p.75). Sin embargo, también se evidencian preocupaciones en torno a la implementación de un debate dentro del contexto escolar, a causa de que este pueda generar una actividad competitiva, en donde prevalezca un punto de vista sobre otro, sin ningún tipo de criterios con “responsabilidad cognitiva” y autocorrectiva, provocando confrontaciones a causa de una actitud negativa hacia el otro y no promoviendo una mirada crítica y reflexiva de los argumentos contrarios.

Para evitar los inconvenientes que el debate tradicional trae a colación en la práctica, la autora Leitão (2012) propone el Modelo de Debate Crítico (MCD) que presenta un enfoque crítico-racionalista, en donde, en vez de que el debate sea orientado en la persuasión y la competencia abierta como lo hace el debate tradicional, el apuesta por la producción de argumentos en “la búsqueda de una resolución crítica de un conflicto de opinión (debate crítico)” (p.29), presentando procedimientos como lo afirman Leitao et al. (2016) tales como: “afirmar y defender ideas propias, buscar razones y evidencias para estas, considerar y evaluar ideas contrarias, y volver a un punto de vista para examinarlo” (p.27). Estos criterios

salen a flote a través de prácticas argumentativas que son el mecanismo por el cual se construyen nuevos conocimientos y se desarrolla un pensamiento crítico-reflexivo. A continuación, se esquematizan las etapas del MDC propuestos por los autores Leitaó et al. (2016), los cuales serán motivo de profundización en el apartado de metodología.

Tabla 2. Etapas de implementación MDC

<i>Fase</i>	<i>Objetivo</i>	<i>Acciones del profesor/participantes</i>
<i>Introducción al tema</i>	Explorar el tema y entender la controversia.	Definir y presentar a los estudiantes la controversia. Organizar formas de acceso a la información y los distintos puntos de vista.
<i>Taller de preparación para el debate</i>	Familiarizar a los estudiantes con los objetivos y la estructura del debate crítico. Preparar la línea de argumentación de cada grupo (GP, GO) y los criterios de evaluación (GIE): • Anticipación de los puntos a favor y en contra. • Actitud proactiva de los participantes en fundamentar ideas. • Calidad y relevancia de los argumentos. • Atención a los argumentos del grupo	Definir y presentar a los estudiantes la controversia. Organizar formas de acceso a la información y los distintos puntos de vista. • Aclarar que el debate crítico está compuesto por tres grupos y el papel específico de cada uno de ellos. • Dividir el total de los estudiantes en tres subgrupos y atribuir a cada uno una función de “proponente”,

	contrario y respuesta dada a estos. • Claridad y actitud respetuosa en la presentación de las ideas. • Respeto a las reglas del debate.	“oponente” o “investigador/juez”. • Coordinar los subgrupos en la planificación de la argumentación de cada grupo. Es importante anticipar posibles contraargumentos del grupo opuesto, y planificar las respuestas. • Coordinar los subgrupos en la elección de tres representantes para la participación directa en el debate. • Atribuir el rol a los estudiantes que no participan directamente: colaborar con sus representantes (coach), en momentos específicos del debate, sugiriendo nuevos argumentos y contraargumentos al GP y al GO o ayudando al GIE en la evaluación final del debate; evaluar la calidad de la argumentación de cada
--	---	---

		intervención del GP y GO en el debate para la discusión en la fase de cierre.
<i>Debate</i>	Poner en práctica habilidades argumentativas.	Coordinar el debate según las etapas y el tiempo de intervención de cada grupo. Recordar a la audiencia su rol o función (coach, evaluador).
<i>Cierre</i>	Evaluar la experiencia y la calidad del debate. Realizar el cierre del tema, explicando el conocimiento construido en el ciclo.	Coordinar el grupo en una evaluación colectiva del debate el debate ¿estuvo bien evaluado por el GIE?; los argumentos y contraargumentos ¿estuvieron bien fundamentados?; las ideas ¿eran claras?; ¿qué aspectos podrían mejorarse?). Explicar las ideas y los conceptos que no hayan quedado claros.

Fuente: (Leitao et al; 2016).

De acuerdo con estos autores, la finalidad que persigue el MCD es hacer una evaluación de los argumentos a favor y en contra de un fenómeno o problema de interés común, que permita reevaluar el pensamiento que se tiene del mismo, a través de la identificación de argumentos sólidos y bien fundamentados que respalden los juicios de valor expuestos en debate y en consecuencia su incorporación al pensamiento. Para los propósitos del presente trabajo de investigación el material discursivo que orientará el MDC son los experimentos mentales contruidos por los participantes, en donde cada situación hipotética a ser imaginada presentará dos posibles resultados igualmente posibles que serán motivo de debate en el aula.

4.2 Experimentación mental

La experimentación mental juega un papel ineludible en la enseñanza de las ciencias, debido a que, en varios dominios de las ciencias es irrealizable la experimentación física en contextos reales. Asimismo, la experimentación mental puede complementar las evidencias encontradas en la experimentación física realizando predicciones de resultados de experimentos que aún no pueden ser realizados o que probablemente nunca podrán realizarse (Cooper, 1999). Por otro lado, la experimentación mental permite predecir resultados a partir de una serie de experiencias a través de las cuales los estudiantes de ciencias llegan no sólo a presentar aproximaciones a conocimientos científicos, sino también a conjeturar resultados asombrosos que escapan de lo previamente conocido (Mach, 1948). Siguiendo a Mach, Podemos afirmar que “el estrecho vínculo entre el pensamiento y la experiencia es la base de la ciencia moderna” (Mach, 1948, p.170) en dónde, en muchos casos, particularmente en el contexto de la física moderna relativista, las ideas no son compatibles con los hechos, a causa de vislumbrar fenómenos que sólo en condiciones alejadas a nuestra realidad sensible pueden realizarse.

El físico y fisiólogo austriaco Ernst Mach considera que “el hombre que llega a un desarrollo intelectual avanzado, recurre a menudo a la experimentación mental” (Mach, 1948, p.159) que desde la imaginación se busca relacionar lo previamente conocido en el mundo natural con conocimientos puramente abstractos de las ciencias. El autor afirma que es común experimentar con los pensamientos a través de elementos conservados por el recuerdo y el lenguaje, siendo construcciones mismas de la experiencia, por lo cual, también se considera la experimentación mental como condición previa a la construcción de un experimento físico, debido a que éste antes de ser construido, debe ser pensado. “La experimentación mental, tan importante para el físico profesional, es también necesaria para el desarrollo psíquico del individuo” (Mach, 1948, p. 167), permitiéndole plantearse problemas cuyas situaciones sean contradictorias en la realidad; dichas situaciones ambiguas de la ciencia, también denominadas paradojas, son el andamiaje para establecer el vínculo entre el pensamiento y la experiencia.

Kuhn (1982), por su parte, afirma que “los experimentos imaginarios ayudan al científico para que se llegue a leyes y teorías diferentes de las que ha sostenido antes” (p. 265), esto con el propósito de eliminar contradicciones lógicas en los principios físicos establecidos y que el avance científico ha permitido descartar. El autor afirma que una de las condiciones para llevar a cabo un experimento

imaginario es que sea construido en el mundo real, este a su vez se encuentra sujeto a una cuestión de verosimilitud, en el cual el científico pueda aplicar los conceptos y hechos empíricos aprendidos previamente en la construcción del escenario imaginativo. Así, Kuhn considera que el experimento imaginario debe ser familiar para el científico, “nada acerca de la situación imaginaria puede ser completamente desconocido ni extraño” (p. 275), por lo cual, un experimento imaginario al no contener información nueva sobre el mundo “no puede enseñar nada que no sea ya conocido” (p. 276)”. Sin embargo, a través de la experimentación mental el científico aprende también acerca del mundo y los conceptos que construye, basándose en la eliminación de esquemas conceptuales. Según él, “el experimento imaginario es una de las herramientas analíticas esenciales que se emplean durante la crisis y que contribuye a promover la reforma conceptual básica” (p. 287), lo que permite el cambio en la visión del mundo que presentaba el científico, promoviendo en la experimentación mental la habilidad de flexibilidad de pensamiento. El autor afirma:

El conflicto que se le presenta al científico en la situación experimental debe ser tal que, independientemente de lo confuso que se vea, ya debe habersele presentado antes. A menos que posea ya una gran experiencia al respecto, no estará preparado para aprender sólo de los experimentos imaginarios (p. 201).

Mettini (2020) afirma que un experimento mental es una práctica cuyo objetivo es la construcción de un conocimiento del mundo físico a través de un ejercicio del pensamiento, que desde la física moderna permitió la construcción de modelos idealizados que no podían ser reproducidos en la vida real. Esta forma de experimentación fue, desde finales del siglo XIX, explícitamente considerada como una forma de construir conocimiento científico.

De acuerdo con Mettini (2020), la experimentación mental en ausencia de una intervención en el mundo natural, presenta un potencial epistémico en la producción del conocimiento científico, a través de la creación de sistemas idealizados en los cuales se ponen a prueba hipótesis que no pueden ser reproducidas experimentalmente, ya sea por motivos de limitaciones tecnológicas de la época o por la complejidad de encontrar las condiciones necesarias para su reproducción. Sin embargo, la autora afirma que la “manipulación mental de escenarios imaginados permite derivar ciertas consecuencias acerca del comportamiento de fenómenos físicos” (p.200).

Para comprender este potencial epistémico de la experimentación mental, la autora explicita su funcionamiento afirmando que este permite un razonamiento subrogativo, en el cual los experimentadores pueden derivar conclusiones a través del comportamiento de modelos idealizados del fenómeno y extrapolar sus efectos al mundo natural. En este sentido, la autora afirma que “las idealizaciones empleadas en los modelos se asocian, en general, a estrategias de simplificación o distorsión. Las simplificaciones se realizan con el propósito de hacer más tratables problemas complejos” (p. 208). En consecuencia, permitiendo “la supresión de información relevante” (p.208), por ejemplo, en la caracterización de objetos, instrumentos, eventos o cantidades físicas involucradas en el experimento mental.

De acuerdo con la autora, los experimentos mentales presentan diferentes herramientas representacionales, las cuales permiten el acceso al fenómeno o sistema físico, a través del uso de “proposiciones lingüísticas, representaciones visuales, esquemas y diagramas” (p.209), por ejemplo, en la descripción de un escenario mental a través de recursos orales o narrativos. La autora resalta el hecho que “los experimentos mentales suelen incluir diagramas o esquemas cuya visualización es esencial para interpretar el experimento” (p. 206), considerando que tales “modelos vinculan los principios teóricos con un dominio de fenómenos” (p. 207), que fundamentan teóricamente la pertinencia y relevancia de la construcción de un experimento mental en un determinado dominio de las ciencias.

Romero & Aguilar (2011) definen la experimentación mental desde la enseñanza de las ciencias “como la construcción de un escenario hipotético donde se representan circunstancias o eventos que emergen de consecuencias igualmente creadas por el sujeto a partir de conjeturas que responden a una intencionalidad” (p. 170). Los autores afirman el vínculo entre la experimentación mental y la experimentación en ambientes naturales, donde “el experimento mental está sujeto a ciertas exigencias teóricas que comparte con los experimentos reales” (p.171), resaltando la importancia de establecer criterios que permitan una validez interna de la experimentación mental, los cuales sean coherentes con los principios y teorías físicas. De acuerdo con Romero & Aguilar (2011) la experimentación mental desde la enseñanza de las ciencias presenta como funciones y características: la profundización de teorías físicas, el análisis de suposiciones o teorías que sustentan conjeturas, el análisis conceptual de contradicciones y/o ambigüedades, además de su aplicación en el campo de las ciencias. De acuerdo con el planteamiento de los autores y a los propósitos de esta investigación, se considera pertinente el uso de la experimentación mental, ya que permite la producción de controversias que den apertura al desarrollo

del pensamiento crítico y la elaboración de argumentos de calidad, para defender ideas previamente pensadas y autocorregidas.

Tomando las narrativas de autores como Norton (1991) y Rips (1998) que serán motivo de estudio en el presente apartado, la experimentación mental puede servir como andamiaje para el desarrollo de habilidades críticas, en tanto pueden ser abordadas en estrecha relación con los procesos de argumentación para fortalecer y/o cambiar de nuestras creencias y visiones de mundo. Con este propósito, la experimentación mental puede ser considerada como un tipo de argumento, el cual es validado por otras personas en un contexto particular, a través de un ejercicio conversacional o dialéctico (Rips, 1998), que permite el desarrollo de habilidades como: La flexibilidad de pensamiento, la autorregulación y la revisión de perspectivas, inherentes al pensamiento crítico.

4.2.1 El experimento mental como argumento

En el contexto de la física moderna, Norton (1991) define los experimentos mentales como argumentos, los cuales presentan las siguientes condiciones: (1) *Plantean situaciones hipotéticas o contraria a los hechos*: Esta condición otorga a los experimentos de pensamiento su cualidad innata, ya que presentan escenarios antagonistas a los hechos fácticos, adoptándose suposiciones por fuera de lo que es comprobable de forma empírica, siendo creaciones mentales propias del experimentador físico. (2) *Abocan aspectos irrelevantes para la generalidad de los resultados*: Esta condición hace referencia a los detalles del experimento también denominados particularidades, a pesar de que no sean relevantes en las conclusiones de la experimentación, son elementos que lo hacen tener un carácter experimental, esto se ejemplifica claramente en la experimentación mental realizada por Einstein (1912) cuyo objetivo era demostrar que los efectos de la gravitación se asemejan a los de la aceleración de los cuerpos materiales, poniéndonos a imaginar para tales propósitos a un físico que había sido drogado, despertándose encerrado en una caja. El hecho de que sea físico, y que haya sido drogado, a pesar de que son aspectos irrelevantes en los resultados finales, son importantes para la elaboración de una experiencia mental, y hacen parte de los argumentos del experimentador.

De acuerdo al autor, los experimentos mentales nos brindan información acerca del mundo físico; sin embargo, esta información no proviene de nuevos datos empíricos, sino de un argumento identificable

proveniente de información previamente conocida y aceptada, donde la experimentación mental se basa en la reconstrucción de razonamientos y cuyas formas de argumentación pueden ser tanto de carácter deductivo (cuyas premisas se fundamentan en teorías físicas) o en formas de argumentación inductiva (donde premisas son basadas en generalidades filosóficas y no en teorías físicas específicas).

De acuerdo a las características enunciadas, el autor afirma que un experimento de pensamiento es un argumento que tiene la cualidad o atributo de credibilidad, en la medida que puedan plantearse situaciones contrafácticas que justifiquen su rótulo de “pensamiento” y traigan consigo detalles o situaciones particulares que no conduzcan a una respuesta lógica para que tenga el rótulo de “experimento”. Estas condiciones anteriores son suficientes más no necesarias para tener un experimento mental, ya que un argumento convencional podría tener las condiciones (1) y (2) sin este ser un experimento mental. De acuerdo al autor, una condición suficiente es el nivel de descripción y detalle que el experimentador realice de su experimento, demostrando credibilidad en los procedimientos que se llevan a cabo. Dentro de estos procedimientos en la elaboración de un experimento mental el autor menciona:

(a) Reconstrucción de experimentos mentales: Debido a que no es evidente a primera vista que un experimento mental sea un argumento, éstos deben ser reconstruidos teniendo estas características. Para tales fines, la experimentación mental debe ser valorada conforme a criterios de racionalidad, empleados para juzgar la bondad de un argumento o la calidad del mismo. En consecuencia: “Un buen experimento mental es un buen argumento; un mal experimento mental es un mal argumento” (p.130). En este sentido, autores como Boisvert (2004) y Lipman (2003) mencionan los criterios para que un argumento sea de calidad, en cuyo caso debe presentar “responsabilidad cognitiva”, siendo coherente con los principios y reglas físicas que sustenten su construcción.

(b) Tesis de eliminación: Los experimentos mentales, al considerarse argumentos, presentan detalles irrelevantes para la generalidad de los resultados, los cuales pueden ser eliminados en tanto las conclusiones puedan demostrarse sin estos detalles. De acuerdo con Norton (1991), “Los experimentos mentales suelen introducirse cuando el argumento directo sería difícil desarrollar. Por ejemplo, una derivación directa del resultado deseado dentro de una teoría puede ser posible pero extremadamente engorrosa” (p. 130).

(c) *Clasificación de los experimentos mentales*: Las conclusiones de un experimento mental deben ser libres de las particularidades descritas en la condición (2). De acuerdo con el autor, los experimentos mentales se clasifican en dos tipos, dependiendo de la forma en cómo son eliminadas dichas particularidades:

Tipo 1: Las conclusiones libres de particularidades se desarrollan deductivamente de las premisas. Los experimentos mentales de este tipo suelen ser *argumentos de reducción*, cuyos detalles pueden estar implicados en un contraejemplo de una afirmación universalmente cuantificada, cuya contradicción conlleva a conclusiones, en consecuencia, a la eliminación de particularidades.

Tipo 2: Las conclusiones de la experimentación mental son construidas de forma inductiva. En donde los detalles o particularidades son eliminadas a causa de “no ser esenciales” dentro de una afirmación, dado que la misma es válida en otros contextos, los cuales derivan resultados concluyentes.

Como ejemplo ilustrativo, para que un experimento mental sea un argumento de reducción, es decir, del *tipo 1*, Este puede presentar premisas con una connotación de imposibilidad. Por ejemplo, consideremos la premisa: “Es imposible que un objeto material alcance la velocidad de la luz, siendo esta última la velocidad límite”; bajo esta premisa, supongamos la siguiente afirmación con connotación universal que será puesta a verificación: “Ningún fenómeno luminoso c , es una onda mecánica”, se busca un contraejemplo, el cual es: “Existe un fenómeno luminoso c , que requiere de un medio de propagación”, cuya experimentación mental tendrá una serie de particularidades que permitirá la demostración del contraejemplo, describiéndose de la siguiente forma: Un individuo observa a un policía que persigue a un infractor de tránsito. Suponiendo que el infractor se convierte en una onda luminosa de naturaleza mecánica y el policía logra alcanzarlo. ¿Cómo vería a tal infractor convertido en rayo de luz? de acuerdo a este experimento mental, el rayo de luz es una onda de naturaleza mecánica, por lo tanto, podría alcanzar el rayo de luz hasta tener las mismas velocidades y por consiguiente verlo en un aparente estado de reposo. Sin embargo, el comportamiento de una onda en estado de reposo no existe en la naturaleza, igualmente, conforme a las reglas establecidas inicialmente, un cuerpo no puede sobrepasar la velocidad de la luz, generándose una contradicción. Por lo cual, se concluye que el rayo de luz no posee las propiedades de una onda mecánica, por consiguiente, no es una onda mecánica. Finalmente son

eliminados los detalles del experimento *tipo 1*, generándose resultados concluyentes conforme a la afirmación inicial.

La ventaja de la experimentación mental, de acuerdo con el autor, es facilitar el análisis de situaciones particulares, cuya interacción entre diferentes efectos conduzca a la generalidad de conclusiones. En el ámbito de la física moderna, una característica común de los experimentos mentales de Einstein en el contexto de la relatividad especial y general, es profundizar desde una postura filosófica la relación entre teoría y observación, adoptando la observación como método de validez sobre las construcciones teóricas. En este aspecto, el autor declara que el método de verificabilidad en la construcción de teorías se basa en que: “Una teoría no debe utilizar términos teóricos que no tengan apoyo observacional” (p.134).

No obstante, esta afirmación genera inconvenientes desde la experimentación mental, debido a que se desconoce qué es exactamente apoyo observacional. ¿Cómo identificar que una teoría emplea términos sin apoyo observacional? ¿Cómo identificar estos términos? Einstein responde a estas preguntas afirmando que no es necesario dar cuenta de la presencia de apoyo observacional en una teoría, ya que esta puede ser corroborada a través de un *principio de verificabilidad particular*, es decir, dos estados son diferentes, aunque ninguna observación verifique sus diferencias. En consecuencia, el método de verificabilidad para la construcción de teorías se resume como: “La teoría no debe distinguir estados de cosas que no son distintos desde el punto de vista observacional” (Norton, 1991, p.134). En este sentido, todo término que carezca de fundamento observacional debe ser eliminado, siempre y cuando desde la teoría propuesta, se genere ambigüedad en que dos estados equivalentes desde el punto de vista observacional sean distintos.

Como ejemplo ilustrativo, para que un experimento mental sea considerado del *tipo 2*, este debe contener uno o más pasos inductivos, los cuales deben ser detallados explícitamente con el propósito de reconstruir la experimentación mental como un argumento. Consideremos el experimento mental del imán y el conductor realizado por Einstein en 1905, el cual consistía en el fenómeno de la inducción electromagnética dentro de la electrodinámica clásica. La teoría clásica afirmaba la existencia de una sustancia denominada éter, que determinaba un estado de reposo absoluto; por su parte, la teoría electromagnética implicaba que la velocidad de la luz en el vacío era constante, aspecto por el cual su

medida era independiente de la rapidez de la fuente. ¿Cómo era posible este resultado con una sustancia que determinara un estado absoluto de reposo? Lo que Einstein pretendía con esta pregunta era que la electrodinámica prescindiera del estado de reposo absoluto. Para ello, consideró un experimento mental construido por un imán y un conductor con movimiento relativo. En primera instancia, imaginó el imán en reposo absoluto y el conductor en movimiento; el movimiento de éste a través del campo magnético generado por el imán, producía una fuerza electromotriz que generaba una corriente la cual podía ser medible. En segunda instancia, imaginó nuevamente a estos dos elementos, pero en este caso el conductor estaba en reposo absoluto y el imán en movimiento. La mecánica clásica brinda una explicación muy diferente para ambos casos. El movimiento del imán genera un campo magnético cambiante que induce a una inducción eléctrica, la cual produce una corriente en el conductor de la misma magnitud que en la primera situación. De acuerdo con Einstein, la presencia de esta corriente eléctrica inducida se distingue en ambos casos. Sin embargo, en cuanto a la verificabilidad de carácter observacional, ambos son indistinguibles. Por lo cual Einstein (1917) concluye que ejemplos de este tipo, junto con los intentos infructuosos de descubrir cualquier movimiento de la tierra en relación con el “medio ligero”, auguran que los fenómenos de la electrodinámica, así como los de la mecánica, no poseen propiedades que correspondan a la idea de realidad absoluta.

Ahora es sencillo reconstruir el experimento mental como argumento. Siendo de forma abreviada:

(a) En la situación de la inducción electromagnética, al plantearse un estado absoluto de reposo, la electrodinámica clásica distingue estados que son indistinguibles desde una perspectiva observacional. Por lo cual, para esta situación, la electrodinámica clásica viola el método de verificación de la teoría expuesta. (b) En consecuencia, las velocidades absolutas deben eliminarse como explicación teórica de la inducción electromagnética. (c) *Paso inductivo (buscando generalidades en otros contextos)*: Existen otros ejemplos de este tipo, en los cuales se han realizado intentos infructuosos de percibir el estado de reposo a través de experimentos ópticos. Luego, (d) Las velocidades absolutas deben suprimirse de la electrodinámica. Finalmente son eliminados los detalles del experimento *tipo 2*, generándose resultados concluyentes conforme a la afirmación inicial del estado absoluto de reposo.

Como se aprecia, el autor atribuye criterios de racionalidad en la reconstrucción de un experimento mental, juzgando bondad o calidad del mismo bajo estos criterios; sin embargo, autores

como Toulmin (1977) y Lance J. Rips en su artículo “Reasoning and conversation” publicado en 1998, afirman que, es de precisar la importancia de criterios de *razonabilidad* para atribuir bondad en un argumento, en cuyo caso se refiere a la capacidad de aceptación o validación por otras personas dentro de un contexto particular, atendiendo a normas sociales y al contexto sociocultural. Bajo esta postura, un argumento es producto de un ejercicio conversacional o “dialéctico”, en donde se tiene lugar acuerdos de cooperación para avanzar en una discusión, considerando puntos en común y aspectos discrepantes conforme a las creencias de los participantes, que a través del diálogo serán aceptadas o rechazadas. Hamblin (1992, como se cita en Rips, 1998) afirma: La argumentación es una forma de gestionar los conflictos entre puntos de vista que apela a los méritos del caso, a lo razonable de ciertas conclusiones. La argumentación puede evaluarse en función de los objetivos prácticos de los participantes, por ejemplo, convencer a los demás de sus pretensiones o refutar las de los demás.

Rips (1998) afirma que “la idea central de esta teoría es que un argumento consiste en una afirmación por parte de un participante y una respuesta crítica por parte de otro, en la que la respuesta puede incluir otras afirmaciones y respuestas” (p.412). Bajo esta premisa el autor considera que el diseño de un experimento mental como argumento debe estar respaldado por la “*carga de la prueba*” que un participante pone en debate, es decir, a la responsabilidad de presentar pruebas convincentes para respaldar una afirmación; así, la carga de la prueba determina al ganador de los argumentos puestos en debate. Si un participante hace una afirmación extravagante, eso aumentará la carga de la prueba de una persona (sus pruebas deberán ser proporcionales a las afirmaciones presentadas en discusión). Asimismo, si los argumentos son aceptados mutuamente en debate, la carga de prueba del participante será más ligera, caso contrario de una afirmación que es mutuamente rechazada, en donde su carga de prueba aumenta.

En el trabajo de investigación se asumió a la experimentación mental como parte argumental de las interpretaciones construidas referentes a las situaciones físicas de espacio-tiempo de corte relativista, y su representación correspondiente en el diagrama de espacio-tiempo. Adicionalmente, se propuso una guía de experimentación mental, en donde se identificaron, personas, objetos, instrumentos, cantidades físicas y eventos de gran relevancia para la solución de situaciones hipotéticas de corte relativista propuestas por el investigador.

4.3 Concepción relativista del espacio-tiempo

En el presente apartado se realiza un desarrollo conceptual referente a las concepciones de espacio y tiempo desde una postura clásica y relativista, haciendo un recorrido histórico de los procesos evolutivos de estos conceptos que permitieron redefinir la forma de comprender el mundo físico. Para tales propósitos se integran fuentes primarias como las obras de *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1687) y *Opticks* (1704) de Isaac Newton, *Sobre la teoría de la relatividad* (1998) y *Sobre la electrodinámica de cuerpos en movimiento* (1917) de Albert Einstein, *The Science of mechanics* (1919) de Ernst Mach y *Space and time* (2012) de Hermann Minkowski. Adicionalmente, se emplean fuentes secundarias tales como: *Relativity theory: Its Origins & impact on modern thought* (1989) de Pearce Williams, *El universo de Einstein* (2004) de Michio Kaku, *Biografía de la física* (1960) de George Gamow, *Introducción a la relatividad especial* (2021) de James Smith, *A Firts Couerse in General Relativity* (2009) de Bernard Schutz, y artículos como *The Substantivalist View of Spacetime Proposed by Minkowski and Its Educational Implications* (2000) de Levrinin, e *Historicidad y pseudo-historicidad del universo: un análisis del concepto de simultaneidad* (2013) de Bermejo.

En el año 1687 se publica en Inglaterra el libro titulado “*Philosophiae naturalis principia mathematica*” del autor Isaac Newton, profesor Lucasiano de Matemáticas de la Universidad de Cambridge, en el cual, basándose en las observaciones de Galileo referentes al movimiento, expone los principios matemáticos que explican los fundamentos de la física, con el propósito de enunciar las leyes del movimiento que irían a constituirse en los cimientos de la física clásica. Para explicar estas leyes, Newton define el espacio y el tiempo como entidades absolutas, inmutables e independientes.

En el Escolio de las definiciones propuestas, Newton (1687), se hace alusión al tiempo y al espacio absolutos afirmando que:

El *tiempo absoluto* se caracteriza por ser uniforme, sin relación con nada externo. Es un tiempo independiente del cambio, es decir, un tiempo que transcurre en ausencia de movimiento. Sin embargo, el tiempo ordinario medido por el hombre debido al movimiento de los cuerpos, también denominado tiempo relativo, es una medida sensible y externa que emplea un instrumento de medida, expresado cotidianamente como: Horas, días, meses, años (p.88).

Al igual, el espacio absoluto (o inmóvil) al no presentar relación con nada externo es uniforme e inamovible, es el espacio donde ocurren todos los eventos físicos y es independiente de la presencia o movimiento de los cuerpos. Sin embargo, la medición de la posición de un cuerpo con respecto a otros cuerpos o sistemas en movimiento determinan un espacio relativo. De acuerdo a lo anterior, se define el movimiento absoluto como el movimiento de un cuerpo con respecto al espacio absoluto. Por otro lado, el movimiento relativo de un cuerpo se define como el movimiento con respecto a otros cuerpos o sistemas de referencia en estado de movimiento (Newton, 1687).

Así, Newton (1687) afirma que el reposo real o absoluto es la condición en la cual, el cuerpo no experimenta ningún cambio en su estado de movimiento con respecto al espacio absoluto, mientras que, el reposo relativo se define como un estado de permanencia con respecto a otros cuerpos o sistemas de referencia. A manera de ejemplo, el espacio relativo de un cuerpo en un velero en movimiento, es la región que ocupa y que se mueve junto con el barco, y el reposo relativo es su estado de permanencia con respecto al barco. Si bien el estado de reposo tiene como propiedad que los cuerpos presenten este estado de movimiento uno con respecto a otros, es imposible saber, a partir de la posición de los cuerpos entre sí en nuestras regiones próximas, si existe un cuerpo en reposo absoluto en una región remota (Williams, 1989).

Siguiendo con el ejemplo anterior, si consideramos que la tierra está en reposo absoluto, el cuerpo que se encuentra en reposo relativo con respecto al barco, se moverá con la misma velocidad absoluta del barco. Sin embargo, si ahora suponemos que la tierra se mueve en el espacio inmóvil, el movimiento absoluto del cuerpo dependerá de la velocidad de la tierra y del barco. Si consideramos que el cuerpo también presenta un movimiento relativo con respecto al barco, el movimiento absoluto del cuerpo dependerá del movimiento absoluto de la tierra en el espacio absoluto, y de los movimientos relativos tanto del barco como del cuerpo en cuestión.

Conforme a esto, se sustenta el teorema de adición de velocidades en mecánica clásica, que establece la combinación (suma) de las velocidades de dos cuerpos en movimiento relativo entre sí, cuyos resultados son validados empíricamente bajo condiciones de velocidades ordinarias. Sin embargo, este razonamiento que será insostenible en la física relativista de Einstein, fue en su época una de las bases del movimiento relativo de los cuerpos bajo marcos de referencia inerciales.

El hecho de considerar el espacio como un ente absoluto conllevaría a la existencia de un sistema de referencia con estas características, desde donde se evaluaría el estado de movimiento de cualquier cuerpo material.

El hecho de considerar el tiempo como un ente absoluto, conllevaría a pensar que cualquier cronómetro independiente de su ubicación espacial, estará sincronizado con otro situado a cualquier distancia del espacio universal (Gamow, 1960). La física clásica presenta al espacio y el tiempo como entes diferenciados y absolutos, en donde se tiene como premisa que: “Un segundo sobre la Tierra dura lo mismo que un segundo en Marte o en Júpiter. De la misma manera que el tiempo es absoluto, el espacio también lo es” (Kaku, 2004, p. 16).

Para Einstein (1998), el espacio y el tiempo en el contexto de la mecánica newtoniana presenta dos propósitos esenciales. En primera instancia, “como soporte o marco para el acontecer físico, respecto al cual los sucesos vienen descritos por las coordenadas espaciales y el tiempo. La materia es vista en esencia como compuesta de "puntos materiales" cuyos movimientos constituyen el acontecer básico” (p.120). En consecuencia, el espacio y el tiempo desempeñan un rol geométrico e interpretativo al asumirse dimensiones continuas y absolutas en las cuales se desarrollan los eventos o sucesos físicos considerados por Newton como entes independientes y absolutos, debido a que su existencia no dependía de la presencia o el movimiento de los cuerpos.

El segundo aspecto esencial del espacio y el tiempo considerado por Einstein, era su carácter de "sistema inercial". “De entre todos los sistemas de referencia imaginables, los inerciales se distinguían por el hecho de que respecto a ellos era válido el principio de inercia” (p.120), En el cual, afirma que un cuerpo lo suficientemente apartado de otros cuerpos persiste en su estado de reposo o de movimiento rectilíneo uniforme. Si en un sistema de coordenadas, el movimiento de los cuerpos presenta estas características, afirmamos que es un sistema inercial, también denominado: Sistema de coordenadas de Galileo. En consecuencia, las leyes de la mecánica newtoniana son válidas únicamente en sistemas inerciales (Einstein, 1998).

A estas concepciones del espacio y el tiempo de la mecánica clásica, Einstein enuncia importantes reflexiones que conducen a centrar la atención en la noción del carácter absoluto de la simultaneidad de

eventos. De acuerdo con Einstein (1998), “la Mecánica debe describir cómo varía con el tiempo la posición de los cuerpos en el espacio” (p.12), Basado en esta consideración, el autor propone considerar la siguiente situación: si una persona se para junto a la ventanilla de un vagón que presenta un movimiento uniforme y deja caer una piedra hacia el exterior sin tener en cuenta la fricción del aire, esta cae en línea recta; un peatón que observa el suceso observa que la piedra cae describiendo una curva parabólica. Ante estos acontecimientos Einstein se pregunta: ¿las posiciones sucesivas de la piedra a lo largo del tiempo son en realidad en línea recta o en forma parabólica?, adicionalmente, ¿qué se entiende por movimiento en el espacio? Para dar respuesta a estas preguntas Einstein propone descartar la vaga palabra “espacio”, la cual nos da una idea imprecisa de los eventos ocurridos, reemplazándola por movimiento relativo a un cuerpo de referencia prácticamente rígido (vagón de ferrocarril y terraplén), es decir, conservando sus dimensiones (Einstein, 1998).

Adicionalmente, si en vez de emplear la expresión: “cuerpo de referencia” y éste es reemplazado por “sistema de coordenadas”, estamos en condiciones de dar la siguiente descripción matemática: La piedra describe una recta con respecto a un sistema de coordenadas fijadas rígidamente al vagón. Sin embargo, la piedra describe una parábola en relación con un sistema de coordenadas fijadas rígidamente al suelo (terraplén). En el ejemplo anterior, se observa que no existe una trayectoria independiente, sino una trayectoria relativa a un cuerpo de referencia (Einstein, 1998). Así, para presentar una descripción completa del movimiento en mecánica clásica, Einstein afirma que se debe especificar cómo la posición del cuerpo cambia con el tiempo, esto debe ir acompañado con una descripción del tiempo, la cual permita que los valores temporales sean resultado de mediciones susceptibles a la observación. Para tales propósitos Einstein propone considerar dos relojes de idéntica construcción. El hombre de la ventanilla sostiene uno de ellos, al igual que el observador que está por fuera del vagón; por consiguiente, cada observador determinaría la posición que ocupa la piedra en su propio sistema de referencia conforme a cada tic-tac del reloj, bajo la suposición que ambas situaciones ocurren simultáneamente.

La noción de eventos simultáneos de carácter absoluto propuesta en la mecánica clásica era atribuida al espacio y al tiempo absolutos. En este sentido, Kaku (2004) afirma que los seguidores de Newton comparaban el universo como un reloj gigante, en donde Dios le había dado cuerda en el principio de los tiempos y cuyas agujas han avanzado uniformemente desde entonces siguiendo los principios de

movimiento de Newton. Se pensaba en relojes distribuidos en el espacio de forma sincronizada, que marchaban de manera uniforme para cualquier cuerpo de referencia definido.

Esta concepción de la simultaneidad absoluta dominante en la mecánica clásica durante el siglo XVII, se basaba en ideas de propagación de la luz de forma instantánea, es decir, en la velocidad infinita de la luz; consecuentemente, cualquier suceso físico es percibido en el espacio de manera simultánea (Bermejo, 2013). A su vez la teoría de fuerzas en la física newtoniana presentaba estas características, en donde: “dichas fuerzas actúan instantáneamente en todo el espacio, de manera que una perturbación en un lugar se puede detectar al instante en todo el universo” (Kaku, p.17, 2004).

Debido a la reflexión sobre la comprensión de la naturaleza de la luz en la física clásica, tuvo lugar el cambio de la concepción del espacio y el tiempo. Newton en su obra “Opticks”, defendía la idea de la naturaleza de la luz como un flujo de partículas sometidas a las leyes de la mecánica; sin embargo, a inicios del siglo XIX, se consolidaron evidencias a partir de los trabajos de los efectos eléctricos y magnéticos realizados por el físico escocés James Clerk Maxwell, de que la luz era un tipo de onda, cuya rapidez c era de magnitud constante de $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ (Smith, 2021). A partir de este momento, la física clásica entró en un dilema científico, a causa de que la luz ahora presentaba naturaleza ondulatoria, y en consecuencia para ajustarse a las leyes de la mecánica newtoniana debía moverse en relación a un medio material, determinándose un medio de propagación imperceptible denominado éter, cubriendo la necesidad de un marco de referencia absoluto en la física newtoniana (Kaku, 2004).

Dentro de las propiedades omnipresentes del éter, se afirma que ocupaba todo el espacio, inclusive llenando el vacío más perfecto, siendo una sustancia carente de masa. Adicionalmente, se le atribuían propiedades como su total elasticidad, según la cual, no absorbía energía proveniente de luz que pasaba por él; por último y no menos importante, esta sustancia penetraba la materia libremente, cuyas partículas podían desplazarse a través de la materia; esta propiedad tenía como propósito explicar cómo la luz podía viajar a través del vacío o cualquier medio material (Smith, 2021).

Einstein se interesó por autores tales como Ernst Mach, físico y filósofo vienés que en su obra “The Science of Mechanics” publicada en 1893, ponía en entredicho a los físicos que discutían aspectos por

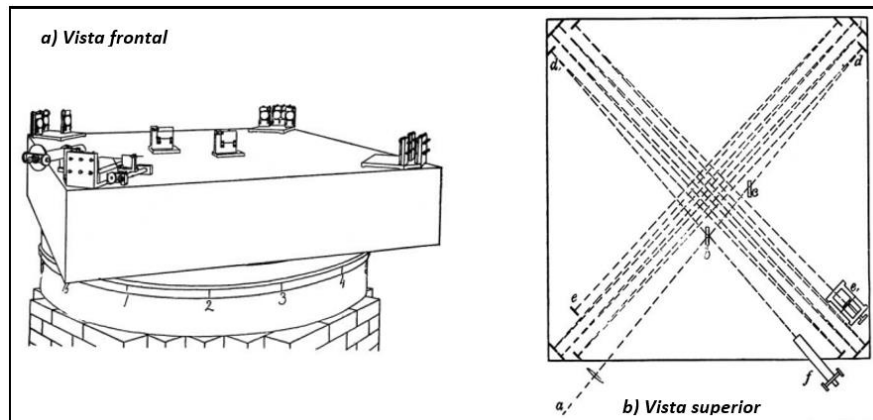
fuera de las experiencias sensoriales y que no fueran confirmados bajo la evidencia empírica, prestando atención a las concepciones de espacio y tiempo absolutos. Para Mach (1919), Newton se encontraba aún en la influencia de la filosofía medieval, a causa de sus consideraciones absolutistas del espacio y el tiempo puramente imaginativas. Si bien todos los principios de la mecánica son soportados experimentalmente a través de posiciones y movimientos relativos de los cuerpos, no puede decirse lo mismo del espacio y el tiempo absolutos, los cuales son constructos mentales que no pueden validarse a través de la experiencia sensible, por lo cual ningún físico ilustrado podría proporcionar argumentos sólidos de la existencia de éstos. Así, Mach (1919) consideraba que la mecánica newtoniana estaba parada sobre arena, debido a que el espacio y el tiempo absolutos no pueden ser medidos experimentalmente.

Nuevos descubrimientos y observaciones realizadas por Albert Michelson y Edward Morley en 1887, encontraron falencias en la mecánica newtoniana, específicamente en la sustancia etérea que soportaba el marco de referencia absoluto y en el que la luz se propagaba libremente por el espacio. De acuerdo con Kaku (2004), estos autores “Razonaron que la Tierra se mueve dentro de un mar de éter, creando un “viento de éter”, y por tanto la velocidad de la luz debería cambiar dependiendo de la dirección en la que se moviera la Tierra” (p.41); es decir, su rapidez no era todo el tiempo $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ con respecto al éter.

El experimento de Michelson-Morley consistía en que un solo rayo de luz dividido en dos, dispuestos perpendicularmente en direcciones diferentes, se reflejaban en una serie de espejos debidamente colocados de manera que permitieran que éstos regresaran nuevamente llegando a un observador O, logrando interceptarse e interfiriendo mutuamente entre sí (Figura 2). Conforme a los partidarios del éter, se esperaba que los rayos viajaran a una rapidez diferente a causa de que uno de ellos se desplazaba a una dirección contraria al éter generando un retraso en su movimiento, previendo que, uno de los rayos viajara en dirección a la tierra en el mismo sentido del movimiento del éter, y el otro a una dirección de 90° respecto al éter, lo que generaría una desincronización entre ellos cuando llegaran al observador (Kaku, 2004). Sin embargo, Michelson & Morley (1887) descubrieron ante su sorpresa, que la velocidad relativa de la tierra y el éter es tan pequeña en pruebas experimentales, que ese pequeño porcentaje es atribuido a errores sistemáticos; en consecuencia, independiente de la dirección en la que

el aparato se apuntara, la velocidad de la luz era prácticamente idéntica para todos los rayos, concluyendo que no era perceptible el viento de éter en el dispositivo.

Ilustración 2. Figura del Experimento Michelson-Morley publicado en su artículo On the Relative Motion of the Earth and the Luminiferous Ether” de 1887.



Fuente: (Michelson & Morley, 1887).

Se describe el experimento por parte de los autores:

En cada esquina de la plataforma se disponían cuatro espejos “dd”, “ee”. Cerca del centro de la plataforma había un vidrio plano paralelo “b”. Estos estaban dispuestos de tal manera que la luz de un quemador de argán “a”, pasando a través de una lente, incidía sobre “b” de modo que se reflejaba en parte hacia “d”, los dos lápices seguían los caminos indicados en la figura, “bdebf” y “bdebf” respectivamente. Observador a través del telescopio “f”. Tanto “f” como “a” giraban con la plataforma (Michelson & Morley, 1887, pp.337-338).

Abandonar la teoría del éter, a causa de los descubrimientos de Michelson y Morley también implicaría abandonar la mecánica newtoniana, por lo cual se realizaron grandes esfuerzos por salvar la teoría del éter a través de la explicación de Lorentz-Fitzgerald cuya premisa era que el éter comprimía la tierra, haciendo que las reglas de medida en el experimento de Michelson-Morley se encogieran, generando que fuera imperceptible los cambios de rapidez en los rayos de luz. De acuerdo con Kaku (2004) la teoría de Lorentz-Fitzgerald afirma que:

La velocidad de la luz cambia, pero es imposible medirla ya que, cada vez que se intenta, la vara de medir cambia de longitud y se encoge en la dirección del viento de éter la cantidad justa para que parezca que la velocidad de la luz no ha cambiado (p.42).

En este contexto intelectual, entran en escena las premisas de Einstein en el área de la física, que, siendo controversiales para su época, consideran al tiempo y espacio como entes inseparables y relativos, en donde se tiene como premisa que el tiempo transcurrido en la tierra no es el mismo en la luna o en cualquier parte del cosmos y que éste se dilata cuando el observador viaja a velocidad cercana a la luz. Asimismo, el espacio pasa de ser absoluto a distorsionarse conforme a la velocidad que porta cualquier objeto o sistema físico (Kaku, 2004). Einstein critica enfáticamente la noción metafísica del éter como marco de referencia absoluto en su artículo titulado “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento” publicado en 1905, en donde afirma que un éter luminífero como medio de propagación de la luz resulta ser innecesario, debido a que las leyes de la física son iguales en todos los marcos de referencia inerciales independiente de una sustancia etérea, sosteniendo que la velocidad de la luz es la misma y no depende del estado de movimiento de la fuente y del sistema de referencia empleado.

Einstein miraba con perspicacia aquella explicación de la contracción de Lorentz-Fitzgerald, tomándola como un arreglo para justificar una teoría del éter que se rompía a pedazos, y propuso reemplazar la teoría del éter que carecía de sustento científico. En vez de considerar que la materia se contraía a causa del movimiento del éter, era la combinación de la contracción del espacio y la dilación del tiempo quienes generaban tal distorsión espacio temporal, siendo independiente de la rapidez de la luz. Gracias al experimento de Michelson-Morley no quedaban dudas de que la luz presentaba una magnitud constante a cualquier sistema de referencia.

Autores como Kaku (2004) afirman que Einstein a partir de los dieciséis años (ocho años aproximadamente después de haberse realizado el experimento de Michelson-Morley), empezó a desarrollar experimentos mentales que lo llevarían a concebir el mundo de una forma inimaginable hasta la época. Imaginó correr junto a un rayo de luz preguntándose cómo lo vería ante sus propios ojos, teniendo como premisa que el mundo de la física clásica le permitiría alcanzar cualquier cuerpo si el movimiento se efectúa lo suficientemente rápido, imaginando análogamente ver desde un coche el movimiento de un tren: si considera que ambos móviles están a la misma velocidad, los pasajeros del tren

los vería en un aparente estado de reposo. Por consiguiente, Einstein imaginó que, si pudiera moverse a la velocidad de la luz, ésta la vería en reposo, como una onda congelada; sin embargo, Einstein sabía que no existía tal definición comprobada experimentalmente, por lo tanto intuía que la luz presentaba características distintas a los cuerpos regulares en movimiento cuyas velocidades podrían estar al alcance, concluyendo que, de acuerdo a los experimentos de Maxwell acerca de la constancia de la velocidad de la luz, cuya magnitud es de $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$, ésta no podría ser alcanzada, ya que a medida que se acercara a la velocidad de la luz, tendría que acelerar aún más para cubrir la distancia que falta para llegar a la luz, y así infinitamente sin poder llegar a su destino: la onda congelada (Kaku, 2004).

Einstein se preguntó cómo en el mundo newtoniano es posible alcanzar un objeto material en movimiento, y a su vez, declararse en la teoría de Maxwell que la luz siempre presenta la misma velocidad independiente de cómo fuese medida, lo que implicaría el hecho de nunca ser alcanzada. De acuerdo con Kaku (2004), esta incongruencia lo llevó a imaginarse la siguiente situación hipotética: Un agente de policía persigue a un conductor por exceso de velocidad, ahora imaginémonos cambiar dicho infractor por un rayo de luz. Un observador sigue la trayectoria de ambos y evidencia que el agente de policía está corriendo codo a codo junto al rayo de luz. Sin embargo, la versión del agente de policía es totalmente diferente: él afirmaría que, si bien acelera el coche y va cada vez más rápido, el rayo de luz se alejaba cada vez más de él a la misma velocidad sin la más mínima posibilidad de poder alcanzarlo, como si el agente estuviera en reposo. Para Einstein, era incomprensible que dos personas presenciaran el suceso de manera diferente. “Einstein se había dado cuenta de que la visión newtoniana (donde las velocidades se pueden sumar y restar) y la visión maxwelliana (donde la velocidad de la luz es una constante) eran totalmente contradictorias” (Kaku, 2004, p.45).

En uno de sus pensamientos lúcidos, Einstein dilucidó la solución ante tal incongruencia, imaginando viajar en tren pasando por el reloj de la torre de Berna, preguntándose cómo vería el reloj si el tren viajara a la velocidad de la luz, llegando a la conclusión de que al verlo éste parecería estar parado; sin embargo, el reloj que porta en su bolsillo marcharía con normalidad (Kaku, 2004). Este experimento mental le permitió darse cuenta que el tiempo transcurre a diferentes velocidades conforme al movimiento de los observadores. En consecuencia, los eventos serán simultáneos dependiendo del marco de referencia, aspecto contrario a la cosmovisión newtoniana absoluta del tiempo, cuyos eventos eran

temporalmente iguales e independientes del sistema de referencia. Einstein incorporó la explicación de Lorentz-Fitzgerald a su favor, cuya premisa inicial era aducir que el éter contraía la tierra y en consecuencia las reglas de medida, atribuyendo en cambio esta contracción al espacio. Posteriormente afirmó que: “El efecto combinado de la contracción del espacio y dilatación del tiempo se conoce como la “transformación de Lorentz”” (Kaku, 2004, p.47).

Posterior a advenimiento de estas reflexiones y experimentos mentales, En 1904 Einstein publicó en su artículo “Sobre la electrodinámica de los cuerpos en movimiento”, los postulados que serían el pilar de lo que hoy conocemos como la teoría especial de la relatividad (TER), reformulando el concepto clásico de espacio y tiempo. Estos postulados son: (1) Las leyes de la física conforme a las cuales cambian los estados de los sistemas físicos no dependen de los marcos de referencia inerciales. Esto atribuido a que, si bien el espacio-tiempo son relativos dependiendo de su sistema de referencia, dentro de éste las leyes físicas son las mismas en cualquier marco de referencia inercial. (2) La velocidad de la luz de $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$ es constante para cualquier sistema de referencia inercial, independiente si la fuente está en reposo o en movimiento (Einstein, 1904). Esto atribuido a que, “La velocidad de la luz c desempeña, también aquí, el papel de una velocidad límite inalcanzable” (Einstein, 1917, p.36).

Así, dentro del contexto de la física clásica, si se deseaba conocer la velocidad relativa entre dos sistemas de referencia inercial, los cuales eran regidos por el teorema de adición de velocidades, estas eran relacionadas a través de una transformación de las coordenadas de posición y tiempo, con el propósito de que las leyes de la física newtoniana sean invariantes para ambos marcos, denominándose a este proceso transformación de Galileo, válido para velocidades mucho menores a la velocidad de la luz. En la TER, este proceso cambia drásticamente, debido a que si bien las leyes de la física siguen siendo invariantes en cualquier marco de referencia inercial (en donde los cuerpos no experimentan fuerzas o aceleraciones), también se debe garantizar que la velocidad de la luz sea constante para cualquier marco de referencia inercial, por lo cual, para tales propósitos se considera una transformación de coordenadas espacio temporales, denominado transformación de Lorentz, en cuyo caso las velocidades relativas entre dos sistemas de referencia inercial que se mueven a velocidades relativistas, experimentan contracciones de longitud y dilataciones de tiempo. Como la luz es constante en cualquier sistema de referencia, el

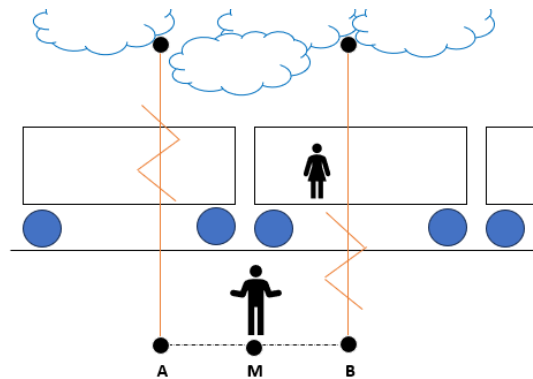
teorema de adición de velocidades es refutado enfáticamente, debido a que la luz no depende del movimiento del emisor que la produce (Einstein, 1998).

En este orden de consideraciones, en la TER, el espacio y el tiempo pierden su carácter absoluto e inmutable, pasando a ser relativos y percibidos de forma diferente conforme al marco de referencia empleado por un observador, en consecuencia, los eventos en el universo de la TER dejan de ser absolutamente simultáneos, para ser percibidos conforme a la ubicación universal del observador, debido a que para un observador un evento pasado, puede ser para otro un evento que ocurre en el presente o que aún no ocurre. En este sentido, Bermejo (2013) afirma:

La mecánica relativista negaría la simultaneidad [Absoluta], a partir del principio de que todas las ondas y partículas no pueden desplazarse a más de 300.000 kilómetros por segundo. Razón por la cual, desde un punto cualquiera del espacio, siempre se percibe un acontecimiento transcurrido en el pasado, debiendo pasarse de la idea de espacio a la de espacio-tiempo (p.109).

Un experimento mental realizado por Einstein en su obra titulada “Sobre la teoría de la relatividad” publicado en 1916, que describe relatividad de la simultaneidad entre eventos es el siguiente: Un rayo cae en dos lugares de la vía muy apartados el uno del otro nombrados A y B. Se presume que ha caído de forma simultánea en estos puntos, sin embargo, se desconoce con certeza tal afirmación. Para tales propósitos se mide la distancia entre A y B y se dispone de un observador ubicado en el punto medio entre estos puntos. El observador es dotado de un dispositivo compuesto por dos espejos dispuestos perpendicularmente, que le permitirían visualizar ambos lugares de forma simultánea. Esto con el objetivo de concluir lógicamente que, si la luz tarda el mismo tiempo en recorrer la trayectoria A-M y B-M, podemos concluir que el rayo impacta los dos puntos de forma simultánea.

Ilustración 3. Experimento mental de Einstein: Caída de un rayo en dos lugares apartados entre sí A y B, además de un observador M equidistante de A y B.



Fuente: Elaboración propia.

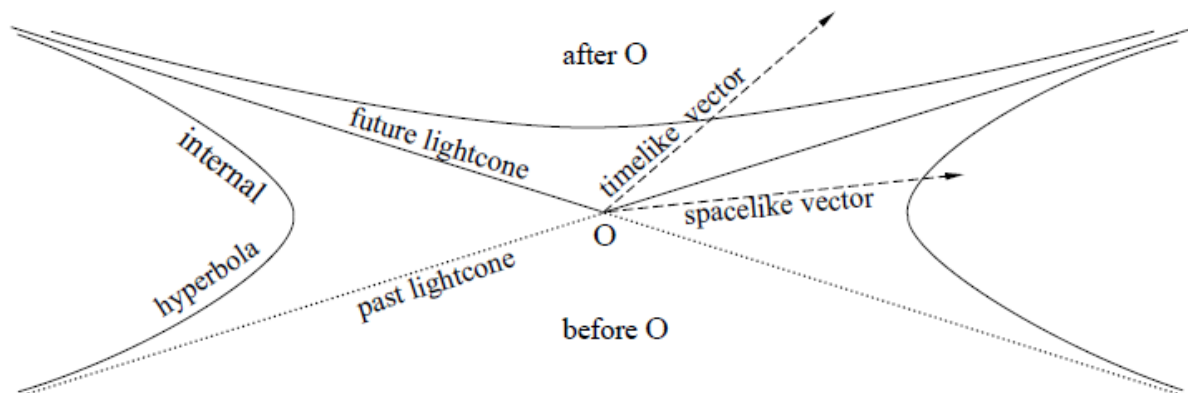
Consideramos ahora la misma situación con un observador M viajando en un tren que se mueve uniformemente, cuyos puntos A y B se ubican en los extremos del mismo equidistante de M, y un observador O en estado de reposo con respecto a la vía que se encuentra justo en el punto medio de ambos impactos. Este último observa que M se aleja cada vez más del punto A, y argumenta que luz del rayo impactado en A deberá recorrer una mayor distancia para llegar al observador M, comparado con la luz del rayo impactado en B; por lo cual, ambos impactos no fueron simultáneos. Sin embargo, la percepción del observador M es totalmente diferente, ya que, al estar en el medio de ambos impactos dentro del tren, ve que el rayo impactó al mismo tiempo en ambos puntos. Bajo estas circunstancias, se concluye que la simultaneidad desde una perspectiva relativista dependerá del propio sistema de referencia; por lo cual, la simultaneidad no es un concepto absoluto como se pensaba en física clásica, y en consecuencia el tiempo entre eventos puede ser diferente en distintos sistemas de referencia.

Si bien la física clásica soporta las explicaciones de los fenómenos naturales que percibimos en el mundo natural y que su aprendizaje sienta las bases para comprender el mundo y el pensamiento científico desarrollado hasta la época; la física moderna permite la adquisición de una perspectiva con mayor profundidad acerca de la naturaleza del cosmos, adoptando modelos que promueven una visión de mundo holística, contraria al reduccionismo difundido en la mecánica clásica.

4.3.1 El espacio-tiempo de Minkowski y el concepto de evento

Por los años de 1906, Hermann Minkowski, matemático y físico alemán, y uno de los antiguos profesores de Einstein cuando estudiaba en el Instituto Politécnico de Zúrich (Suiza), se interesó por su teoría de la relatividad retomando las ideas de Einstein, Minkowski propuso reformular los conceptos del espacio y el tiempo en un lenguaje matemático, concluyendo que el espacio y el tiempo formaban un continuo de cuatro dimensiones, considerando el mundo visible ante nuestros ojos de naturaleza tridimensional y la cuarta dimensión de naturaleza temporal, y construyendo una relación del espacio y el tiempo en una red tetradimensional, pasando a ser llamada como relación espacio-temporal. En su propuesta de representación geométrica, Minkowski denominó “mundo” o “universo” a un conjunto de sucesos individuales, cada uno describiéndose a través de números correspondientes a tres coordenadas espaciales x, y, z y una coordenada temporal t . En este sentido, el universo es considerado también un continuo, ya que para cada suceso existen otros cercanos a él, con coordenadas x_1, y_1, z_1, t_1 .

Ilustración 4. Representación del espacio-tiempo desde una perspectiva geométrica elaborada por Minkowski



Fuente: (Minkowski, 2012).

Con O como vértice que consta de dos partes, una porción con valores de $t < 0$ (parte inferior), la otra con valores de $t > 0$ (parte superior). La primera parte, el cono de luz (pasado de O), consiste de todos los puntos del mundo que envían luz a O, el segundo, el cono de luz futuro de O, consiste en todos los puntos del mundo que reciben luz de O. El área comprendida únicamente por el cono de luz pasado se denomina antes de O. Mientras que el área limitada por el cono de luz futuro se denomina después de O (Minkowski, 2012).

Levrini (2002) menciona que la geometría tetradimensional propuesta por Minkowski se convierte en la forma excepcional para liberar el conocimiento que tenemos acerca del mundo natural en base a experiencias sensoriales de observación y percepción directa (en los cuales el lugar y el tiempo son diferenciados) y adoptar estructuras geométricas en donde nuestra percepción asuma de forma invariable lugares y tiempos en combinación, en cuyo caso el espacio y el tiempo estén destinados a convertirse en uno solo. De acuerdo con el autor, Minkowski no tiene como propósito que el espacio-tiempo sea una representación puramente gráfica de la relatividad especial de Einstein, ni tampoco una abstracción matemática, sino un encuentro entre la geometría, la física y el mundo natural, aduciendo que “el espacio-tiempo deriva del mundo fenoménico, es real e independiente del observador” (Levrini, 2002, p.608).

En este sentido, Minkowski considera la geometría de cuatro dimensiones (el “mundo”) como una entidad primitiva, en la cual los procesos y eventos materiales de la física deben explicarse y predecirse, estando relacionados con la estructura geométrica en la cual están contenidos. De acuerdo con esta representación, los puntos que describen los eventos físicos se relacionan entre sí, a través de trayectorias en el espacio-tiempo también denominadas *líneas de universo*. Se habla entonces que el mundo real es una variedad de cuatro dimensiones, en cuyo caso el espacio-tiempo unificado “debe ser invariante, independiente del observador y, por tanto, absoluto” (Levrini, 2002, p.609). De acuerdo al autor, Minkowski propone un nuevo universo absoluto, que se diferencia del espacio de Newton bajo los siguientes criterios: (1) La invariancia de las leyes físicas en el espacio-tiempo de Minkowski se relaciona no con las dimensiones espaciales separadas de la temporal (como era pensado en el espacio absoluto de Newton), sino con el intervalo espacio-temporal entre dos eventos diferentes. (2) El espacio-tiempo de Minkowski presenta un carácter privilegiado, no por ser el único espacio dotado de realidad (como era pensado en el espacio absoluto de Newton), sino de sus propiedades geométricas en donde: “La propiedad de tener simetrías inherentes no triviales gracias a las cuales el mundo físico es visto por cada observador inercial como idéntico” (Levrini, 2002, p.610). (3) El espacio-tiempo no coexiste por sí solo y su existencia reside en la representación de conceptos que hacen parte de nuestras experiencias.

Gracias al tratamiento geométrico del espacio-tiempo dado por Minkowski, ambos conceptos (tiempo y espacio) fueron unificados por simetría. Para comprender esto, supongamos un copo de nieve, si éste es rotado 60 grados, su estructura no cambia, es decir, éste seguiría viéndose igual. Esto se expresa matemáticamente afirmando que el copo de nieve es covariante bajo una rotación. Minkowski demostró

que las leyes de la física permanecerían covariantes, a pesar de que el espacio y el tiempo roten como objetos tetradimensionales. Esto es importante ya que garantiza que las leyes de la física sean idénticas para cualquier observador, siendo uno de los principios básicos de Einstein a lo largo de su vida. (Kaku, 2004). Un nuevo principio de la física había llegado: Las ecuaciones de la física deben ser covariantes bajo una transformación de Lorentz, es decir, si se da una combinación de dilatación de tiempo y contracción de longitud en el espacio-tiempo, las leyes de la física siempre permanecerán equivalentes.

En esta representación geométrica del espacio-tiempo Minkowski (2012) define un evento (también denominado punto mundial), como un punto en el espacio en cualquier instante de tiempo con un sistema de valores x, y, z, t . Por tanto, un punto en el plano cartesiano con una dimensión espacial y otra temporal representa un evento en el espacio-tiempo.

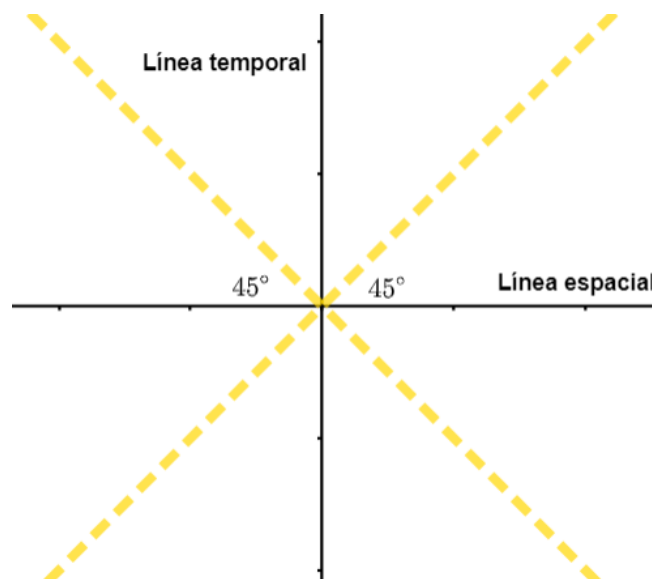
Minkowski (2012) menciona que, para el llenado del espacio-tiempo, se imagina que en todas partes y en cualquier momento hay algo perceptible. Para evitar cantidades como materia o electricidad, el autor emplea la palabra *sustancia* como algo que ocurre en un punto mundial determinado. Se imagina que el punto sustancial existe en el punto mundial con coordenadas x, y, z, t , y que éste puede ser reconocido en otro momento del espacio-tiempo, afirmando que: “Un elemento temporal [muy pequeño] dt , puede corresponder a las modificaciones [muy pequeñas] dx, dy, dz de las coordenadas espaciales de este punto sustancial” (Minkowski, 2012, p.38), obteniendo una imagen “del curso eterno de la vida del punto sustancial, una curva del mundo, una línea del mundo, cuyos puntos pueden relacionarse claramente con el parámetro t de $-\infty$ a $+\infty$ ” (Minkowski, 2012, p.38). El autor también afirma un aspecto importante: “El mundo entero se presenta resuelto en tales líneas de mundo, y quiero decir de antemano que, a mi entender, las leyes de la física pueden encontrar su expresión más completa como interrelaciones entre estas líneas de mundo” (p.38). En general, el mundo se constituye por la variedad de todos los sistemas de valores x, y, z, t , es decir, “el conjunto de todos los eventos abarca la totalidad del espacio y el tiempo (Como unidad)” (Wald, 1982, p.11). Con el propósito de comprender la representación de los eventos y sus relaciones que en el espacio-tiempo, es menester-comprender la semántica de los diagramas propuestos, llamados formalmente diagramas de espacio-tiempo de Minkowski.

4.3.2 Diagramas de espacio-tiempo de Minkowski

Para describir eventos que ocurren en el espacio-tiempo, se usan representaciones geométricas como el diagrama de Minkowski, que permiten la comprensión de movimientos de cuerpos en diferentes marcos de referencia. Estos diagramas de espacio-tiempo emplean un sistema de coordenadas cartesianas, cuyo eje de abscisas (sección horizontal) representa el espacio, mientras que el eje de ordenadas (sección vertical) representa al tiempo.

De acuerdo con Wald (1992), para la interpretación de un diagrama de espacio-tiempo es preciso tener en cuenta las secciones horizontales y verticales en el plano cartesiano. La sección horizontal de la base del diagrama (eje de abscisas) es interpretada como el inicio de la secuencia de eventos, mientras que secciones superiores a la base indican un cambio de posición en un tiempo posterior. El autor afirma que, en un diagrama de espacio-tiempo de Minkowski se grafica el tiempo en el eje vertical y las tres dimensiones espaciales son comprimidas para ser representadas en el eje horizontal. La trayectoria que describe el movimiento de un objeto a lo largo del diagrama de espacio-tiempo se denomina *línea mundial* o *línea de universo* (Véase figura 5).

Ilustración 5. Representación bidimensional del espacio-tiempo de Minkowski.

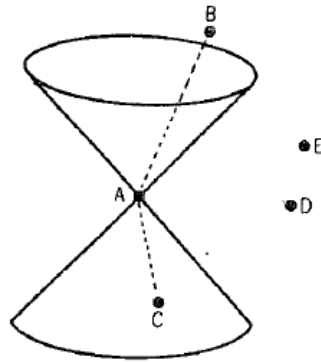


Fuente: Elaboración propia

En el diagrama de espacio-tiempo de Minkowski es importante considerar las siguientes premisas para su correcta interpretación:

- El origen de coordenadas representa el presente de dos o más eventos que ocurren en el espacio-tiempo. Si uno o más eventos se ubican en los cuadrantes III y IV del plano cartesiano, ambos eventos ocurrieron en el pasado, mientras que si uno o más eventos se ubican en los cuadrantes I y II ocurrirán en el futuro.
- En la representación tridimensional del espacio-tiempo (considerando una dimensión temporal y dos espaciales) los rayos de luz con un ángulo de inclinación de 45° generan un cono de luz, siendo infinito hacia el pasado e infinito hacia el futuro. Estas consideraciones dependen exclusivamente si el movimiento se describe como una función lineal $ct = \frac{v}{c}x$, donde ct (rapidez de la luz multiplicada por el tiempo), es la escala asumida para el tiempo.
- Si un evento (pasado o futuro) representado por un punto en el plano cartesiano, está por fuera del cono de luz, este evento no puede estar relacionado causalmente con el evento ubicado en el origen de coordenadas, debido a que el observador no puede moverse a velocidades mayores a las de la luz. Por el contrario, si un evento (pasado o futuro) está dentro del cono de luz, este puede ocurrir para el observador, debido a que necesitará velocidades inferiores a las de la luz para alcanzarlo.

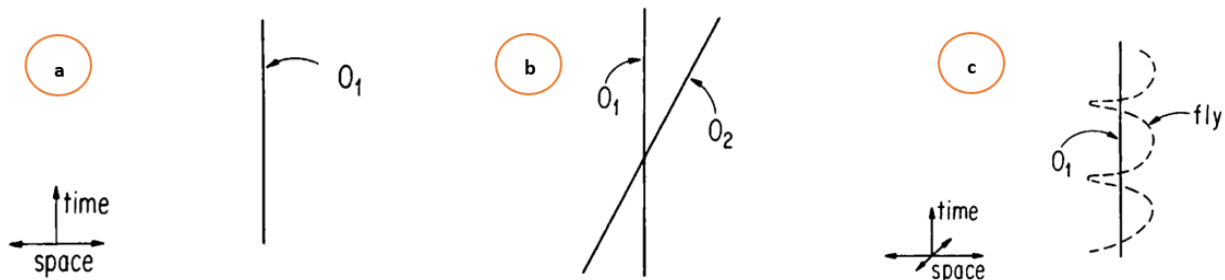
Ilustración 6. Eventos pasados y futuros dentro y fuera del cono de luz.



Fuente: Wald (1992)

A continuación, se muestran algunos ejemplos de representaciones de situaciones físicas en un diagrama de espacio-tiempo:

Ilustración 7. En el diagrama de espacio-tiempo a) se representa la línea de universo de un observador O_1 que permanece en reposo, luego en b) se representa el diagrama de espacio-tiempo de O_1 y otro



observador O_2 que rebasa a O_1 con velocidad constante, por último, en c) se representa el diagrama de espacio-tiempo de un observador O_1 con una mosca que da vueltas alrededor de él.

Fuente: (Wald, 1982).

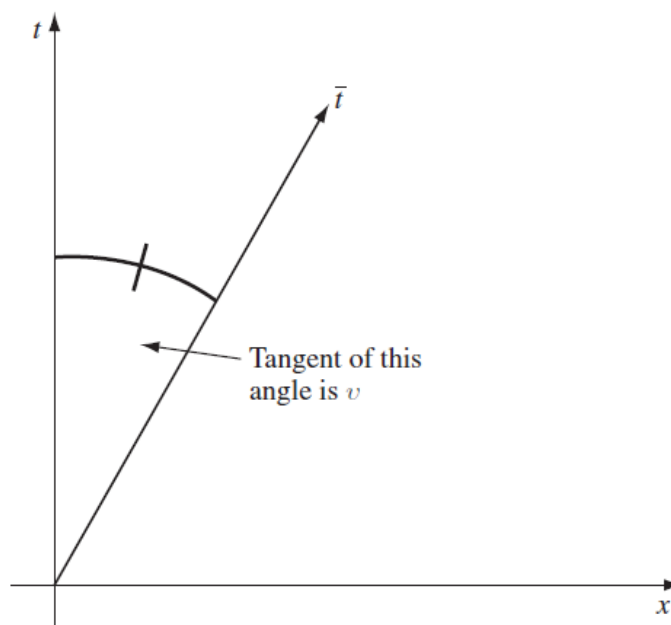
4.3.3 Construcción de las coordenadas espacio temporales de otro observador

En concordancia con el tratamiento geométrico realizado por Minkowski frente al espacio-tiempo, autores como Schutz (2009) afirman que al considerar un observador como un sistema de coordenadas del espacio-tiempo y adicionalmente todos los observadores observan los mismos eventos, sería posible trazar las líneas de coordenadas de un observador en el diagrama de espacio-tiempo dibujado por otro

observador haciendo uso de los postulados de la TER. Supongamos que un observador O emplea las coordenadas x, t positivas, mientras que otro observador O' usa las coordenadas x', t' , moviéndose con una velocidad v en la dirección x con respecto a O . ¿Cómo se representan los ejes de coordenadas para x', t' en el diagrama de espacio-tiempo de O ?

- Eje t' : Este es el lugar de los eventos en $x = 0$ (también $y = z = 0$, no obstante no se tendrán en cuenta para estos propósitos), siendo el lugar de origen de las coordenadas espaciales en O' . Este eje corresponde a la línea de universo de O' que se muestra en la figura 8.

Ilustración 8. El eje del tiempo de un marco cuya velocidad es v .



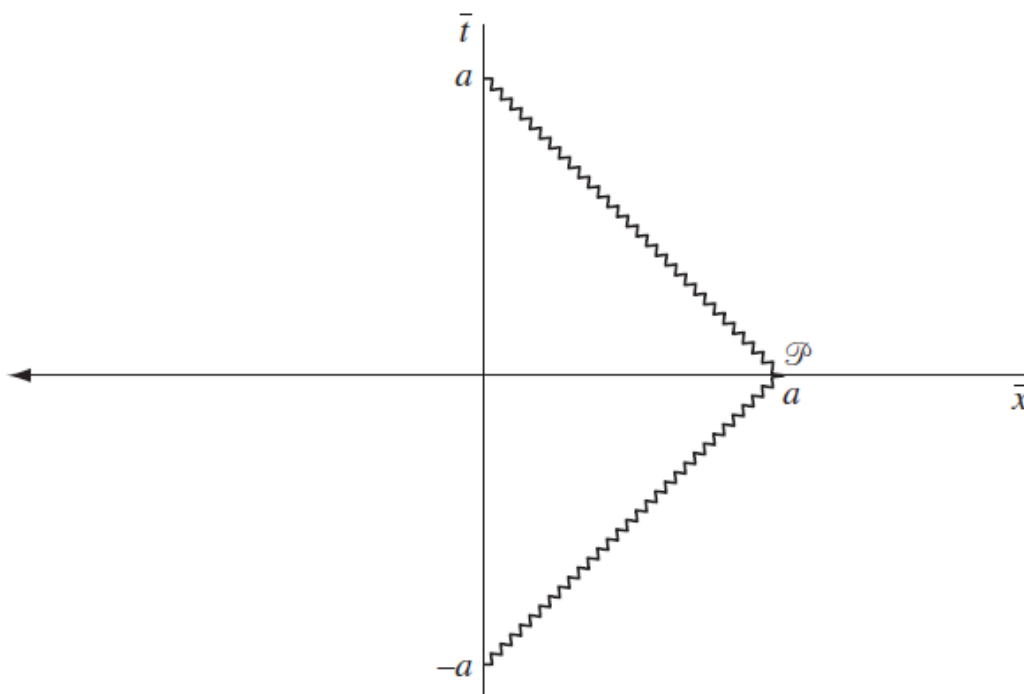
Fuente: (Schutz, 2009).

- Eje x' : Para ubicar este eje se efectúa una construcción para establecer el lugar geométrico de los eventos en $t' = 0$, es decir, aquellos que son simultáneos con el evento $x' = t' = 0$.

Consideremos el diagrama espacio-tiempo de O' que se muestra en la figura 9. Todos los eventos en el eje x' presentan la siguiente propiedad: Un rayo de luz emitido en el evento ε , desde $x' = 0$, en

digamos el tiempo de $t' = -a$, en donde alcanzará el eje x' en $x' = a$ (denominado el evento P), si se refleja, regresará al punto $x' = 0$ en $t' = a$. (denominado el evento R) El eje x' se puede definir, por lo tanto, como el lugar de eventos en donde se reflejan los rayos de luz, de tal forma que regresan al eje t' en a , terminando en $-a$ para cualquier a . Ahora, observemos lo anterior en el diagrama de espacio-tiempo de O como se muestra en la figura 8. Sabemos en dónde se encuentra el eje t' , ya que fue construido en la figura 3. Los eventos de emisión y recepción $t' = a$ y $t' = -a$ que se muestran en la figura 9, dado que es arbitrario, no importa en qué parte de los ejes negativos coloquemos el evento ε , por lo que aún no es necesario hacer suposiciones sobre la calibración del eje t' relativo al eje t . Lo único que importa hasta el momento es que el evento R en el eje t debe estar tan lejos del origen como el evento ε .

Ilustración 9. Luz reflejada en a , medida por O' .

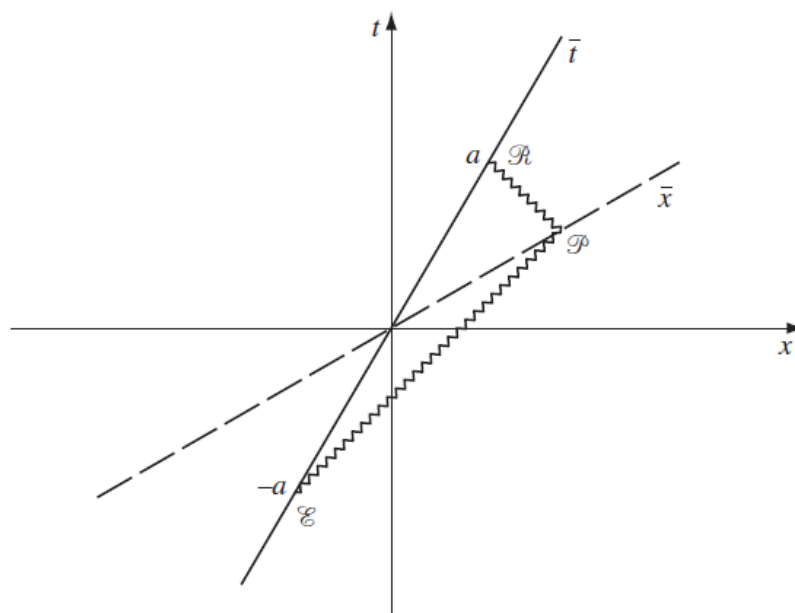


Fuente: (Schutz, 2009).

Una vez dibujados en la figura 9, a continuación, trazamos el mismo rayo de luz que antes, emitido desde ε , y viajando en una línea de 45° en este diagrama. El rayo de luz reflejado debe llegar al evento R, por lo que es la línea de 45° con pendiente negativa que pasa por R. La intersección de estos dos rayos de

luz debe ser el evento de reflexión P. Esto establece la ubicación de P en nuestro diagrama. La línea que lo une con el origen de la línea discontinua debe ser el eje x' , sin coincidir con el eje x . Si se compara este diagrama con el anterior, se observa que en ambos diagramas la luz se desplaza sobre una línea de 45° . Mientras que t y t' varían en su pendiente de un diagrama a otro. Aquí se evidencia el segundo postulado de la TER: El haz de luz tiene velocidad $c = 1$ (lo cual corresponde a $c = 3 \times 10^8 \frac{m}{s}$, con pendiente igual a 1) con respecto a cada observador. Cuando aplicamos esto, a estas construcciones geométricas, se encuentra de forma inmediata, que los eventos simultáneos a O' (la recta $t' = 0$, que corresponde al eje x) no son simultáneos (es decir, no son paralelos a la recta $t = 0$, el eje x). El fracaso de la simultaneidad absoluta es ineludible.

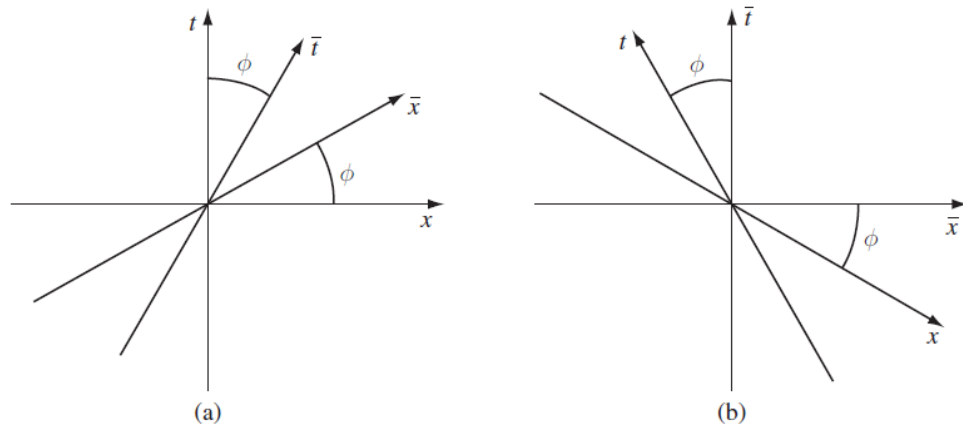
Ilustración 10. Reflexión medida en O .



Fuente: (Schutz, 2009).

Los siguientes diagramas (Figura 11) representan la misma situación física. El de la izquierda es el diagrama espacio temporal O , en el que O' se desplaza hacia la derecha. El de la derecha está dibujado desde el punto de vista de O' , en el que O se mueve hacia la izquierda. Los cuatro ángulos son todos iguales a $\arctan|v|$, en donde $|v|$ es la velocidad relativa de O y O' .

Ilustración 11. Diagramas espacio temporales de O (izquierda) y O' (derecha)



Fuente: (Schutz, 2009).

En el presente informe, la construcción de representaciones geométricas del espacio tiempo permitirá la mediación de consensos para la elaboración de esquemas sustentados, que para tales fines la experimentación mental será el recurso para la elaboración de argumentos de calidad y su posterior transformación a través del consenso y el disenso entre pares.

5 Metodología

En el presente capítulo se ofrece una visión integral de la metodología empleada para el desarrollo de la investigación. En primer lugar, se hace referencia al paradigma que subyace a la presente investigación, que determinará el método de investigación y los instrumentos para el registro de la información. A lo largo de este proceso, se indican tanto las técnicas, como los instrumentos empleados que orientarán el estudio investigativo.

5.1 Paradigma investigativo y método de investigación

La presente investigación se enmarca en un paradigma cualitativo, dado el interés de caracterizar los significados contruidos por estudiantes de nivel medio en Colombia alrededor de la perspectiva del espacio-tiempo de la TER, con el fin de desarrollar su postura crítica y reflexiva en las clases de física. De acuerdo con Sandoval (2002), la perspectiva cualitativa de análisis nos permite comprender los discursos humanos, ya sean de tipo gestuales, verbales o escritos y construir interpretaciones que permitan identificar aspectos comunes de una comunidad para entender su realidad social y cultural. El paradigma cualitativo es pertinente con el propósito general de investigación, debido a que permite involucrar a los participantes de la investigación como generadores de su propio conocimiento, considerando las visiones de mundo que subyacen de sus experiencias vividas en su realidad próxima y cómo pueden ser valoradas y transformadas a través del encuentro dialéctico entre pares.

En el marco de este paradigma de investigación, el presente informe de investigación asume un enfoque fenomenológico con una aproximación interpretativa o hermenéutica, debido a que tal enfoque pretende obtener “descripciones, explicaciones e inferencias, fundamentadas y suficientemente significativas de los fenómenos en estudio” (Camargo, 2021, p.16), propósito que está en consonancia con el objetivo de construir significados a través de las acciones, interacciones y discursos, que a su vez también puedan ser debatidos para su transformación en un contexto sociocultural.

De acuerdo con este enfoque interpretativo, el conocimiento es una construcción social mediada por las interacciones humanas (Runge, 2013), esta significación se alinea con el propósito de investigación debido a que se interesa por comprender la forma en que se da la construcción de conocimientos propios

de la TER en los grados superiores de educación media, a partir de los discursos y construcciones de los significados realizados por los estudiantes, que conlleve a prácticas reflexivas y al desarrollo del pensamiento crítico en el aula, cuando se ven abocados a discutir y desarrollar actividades didácticas centradas en la experimentación mental.

Como parte del proceso de indagación sistemática, cuyo propósito es caracterizar los procesos de argumentación que alcanzan los estudiantes de educación media en una clase de física, se asumirá como método de investigación el estudio de caso. De acuerdo con Camargo (2021), el estudio de caso es una estrategia investigativa que consiste en describir y estudiar una situación particular y su comprensión a partir de resultados teóricos y prácticos a lo largo del proceso investigativo, cuyo investigador construye a priori una serie de presupuestos sobre el comportamiento de los participantes, y la elaboración de interpretaciones de los discursos y acciones desde una fundamentación teórica sólida.

En particular, se asume un estudio de caso de tipo instrumental, significado por Stake (1999) como un caso donde no sólo se busca tener conocimiento de la situación estudiada, sino también tener una comprensión más profunda del mismo, para dar respuesta a un fenómeno o necesidad general o de mayor complejidad. Siendo el caso un instrumento para comprender un fenómeno social particular. En este sentido, el caso es constituido por un grupo de estudiantes de nivel medio, en donde, en línea con Stake (1999) es el contexto analizado para los propósitos investigativos debido a que en el estudio presentado no sólo se puntualiza en el desarrollo de habilidades de pensamiento crítico en estudiantes de nivel medio, sino también en la construcción de nociones de espacio-tiempo relativista a través del diseño de experimentos mentales y su traducción a través de diagramas de espacio-tiempo relativista.

Adicionalmente, se ha escogido el modelo secuencial con solapamientos, debido a que cada una de las etapas de diseño permiten dar claridad de los instrumentos usados para la recolección de datos, a su vez, se considera que es el modelo apropiado para asegurar criterios de rigor que permitan la confrontación de los datos y la descripción detallada de los mismos. De acuerdo con Camargo (2021), el término “solapamiento” hace referencia a que cada una de las etapas pueden ejecutarse de forma simultánea, a pesar de que son descritas en una línea de tiempo diferente.

5.2 Contexto y participantes

La investigación se realizó con estudiantes de educación media académica del Colegio Cristo Rey con edades que oscilan entre los 13 y 16 años, ubicado en el municipio de Itagüí, institución del sector privado de estrato socioeconómico de nivel 3, escogida por ser espacio magisterial del investigador y, consecuentemente, por tener un amplio conocimiento del currículo institucional y las dificultades en cuanto a las habilidades críticas de los estudiantes de educación media. Es importante resaltar que la implementación de la presente investigación se realizó en una jornada contraria a la jornada académica regular, con el propósito de garantizar la participación voluntaria y la disponibilidad horaria de los participantes. Su selección se realizó a través de un proceso de inscripción voluntaria, explicitando los objetivos y actividades a realizar durante la investigación.

Para esta investigación, se seleccionaron un total de 12 participantes. Los criterios de selección incluyeron: (1) que los individuos fueran estudiantes de educación básica y media. Sin embargo, la mayor proporción correspondió a estudiantes de nivel medio, dado que el estudio de caso se centra especialmente en este nivel educativo, (2) que pertenecieran a la misma institución educativa en la que el investigador ejerce su labor magisterial y que presentaran interés y motivación por conocer y reflexionar asuntos asociados a las concepciones de espacio-tiempo y (3) la participación al menos del 80% de las actividades realizadas.

La selección se realizó mediante un muestreo intencional, en donde se seleccionaron a educandos de educación básica y media que estuvieran cursando la asignatura de física o procesos físicos, garantizando que tuvieran un primer acercamiento con el área, además de permitir la inclusión de estudiantes de diferentes niveles educativos dentro de la misma institución.

A cada participante se le asignó una codificación alfabética para preservar su anonimato y facilitar el análisis de los datos. La codificación se estructuró de la siguiente manera: cada participante fue identificado con una letra, comenzando con "PA" para el participante "A", "PB" para el participante "B", y así sucesivamente hasta "PL" siendo el participante "L". Adicionalmente, para algunas actividades propuestas los participantes se organizaron en dos grupos, cuya codificación se estructuró conforme a la estructura del MDC como GP (grupo proponente) o GO (grupo oponente). Esta codificación permitió una

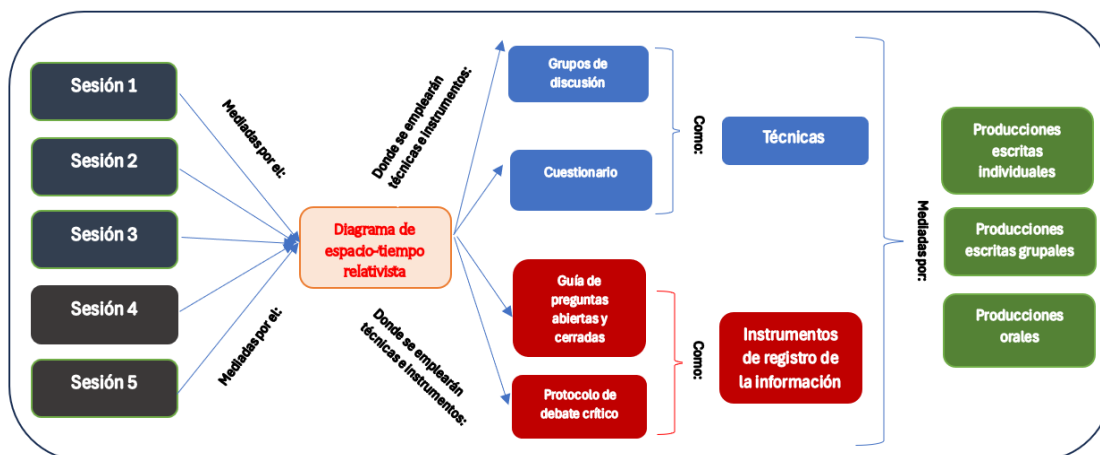
organización eficiente de los datos durante el proceso de análisis, garantizando al mismo tiempo la confidencialidad de los participantes.

5.3 Técnicas e instrumentos de registro de la información

El plan metodológico para la elaboración del presente estudio investigativo se estructuró en 5 sesiones, cada una con una duración de dos horas. Se empleó como técnicas específicas para el registro de la información: La modalidad de cuestionario con preguntas abiertas y cerradas, además de los grupos de discusión, técnicas que permitieron la participación activa de los estudiantes y el favorecimiento de la discusión y el intercambio de ideas. Los instrumentos de registro de información implementados son: Guía de preguntas abiertas y cerradas, además del protocolo de debate crítico, con el objetivo de hacer un acercamiento al fenómeno de estudio y hacer una autoevaluación de los aprendizajes obtenido durante las sesiones de intervención; además, durante las sesiones, se implementó un modelo de debate crítico, con el propósito de hacer una exploración y análisis en profundidad de la investigación.

Estas diversas formas de recolectar la información permitirán su triangulación, donde, según Cisterna (2005) es el “cruce dialéctico de toda la información pertinente al objeto de estudio surgida en una investigación por medio de los instrumentos correspondientes, y que en esencia constituye el corpus de resultados de la investigación”, (p.68).

Ilustración 12. Plan de recolección y organización de la información.



Fuente: Elaboración propia.

En esta misma línea, se describe en que consiste cada una de estas técnicas y su propósito de implementación, haciendo referencia a autores que las desarrollan:

Cuestionario: La presente técnica es usada en investigaciones con un paradigma cualitativo, con el propósito de recolectar gran cantidad de información que refiere al conjunto de opiniones y argumentos, al no limitarse con categorías exclusivamente afirmativas o negativas (Hernández et al; 2014). El instrumento relacionado con esta técnica se divide en dos tipos de preguntas: abiertas y cerradas. De acuerdo con Hernández et al. (2014), las preguntas cerradas presentan opciones delimitadas, en donde solo puedes elegir entre las opciones de respuestas dadas previamente por el investigador (Por ejemplo: “Sí” o “No”), mientras que, las preguntas abiertas dan la posibilidad de libre interpretación de los individuos, respondiendo conforme a la subjetividad del individuo teniendo un panorama amplio de la situación estudiada, no obstante, este tipo de preguntas puede generar dificultades para el investigador en cuanto a la codificación se refiere, contraria a las preguntas cerradas, las cuales pueden ser fácilmente categorizadas. Para los propósitos del informe de investigación se empleó ambas formas de cuestionario, conforme a los propósitos de cada actividad implementada, en donde no solo se diseñó un cuestionario cerrado para conocer el nivel de comprensión de conceptos disciplinares como la simultaneidad entre eventos, sino también el diseño de cuestionarios abiertos para el registro de producciones escritas de corte interpretativo.

Grupo de discusión: De acuerdo con Gil (1993) el grupo de discusión es considerado “una técnica no directiva que tiene por finalidad la producción controlada de un discurso por parte de un grupo de sujetos que son reunidos (...) a fin de debatir sobre determinado tópico propuesto por el investigador” (p.201). El autor afirma que una de las características de esta técnica es su homogeneidad. En donde el grupo de personas reunidas presentan los mismos intereses o características, generando así un entorno seguro para discutir abiertamente pensamientos y puntos de vista sin ningún tipo de juzgamientos. Para el presente informe de investigación, los grupos de discusión fueron el medio por el cual se orientó el MDC, presentando dos resultados por parte del investigador de una situación hipotética de corte relativista, en donde cada grupo se decantó por uno de ellos con el propósito de dar argumentos al grupo contrario en defensa de su respuesta escogida.

El debate crítico: Para la implementación del debate crítico se distribuyeron los participantes en dos grupos característicos: grupo proponente (GP) y grupo oponente (GO), cada grupo compuesto por 6 participantes. El grupo proponente (GP) inició el debate proponiendo una posición que fue contraargumentada, mientras que el grupo oponente (GO) presentó su posición contraria al grupo proponente, presentando contraargumentos validos a su contraparte. Teniendo en cuenta el tiempo limitado de implementación (de 1 sesión) y al ser la primera vez en implementarse esta modalidad, se realizaron una serie de adecuaciones a las etapas del MDC, en donde fue orientado en seis momentos los cuales fueron: (1) Exposición de argumentos en defensa de cada postura de análisis, (2) formulación de preguntas al grupo contrario conforme a los argumentos propuestos, (3) respuestas para el encuentro de razones y evidencias en cada uno de los grupos, (4) contraargumentos (si los hay) explicando porque no son posibles las respuestas del grupo contrario y (5) etapa de cierre, en donde cada grupo declara continuar con su postura o adoptar la posición del equipo contrario. Las etapas de introducción al tema y los talleres de preparación al debate fueron desarrollados a través de la realización de los cuestionarios dados a priori para la realización del debate crítico. Por último, el grupo de investigación estuvo integrado solamente por un moderador, cuyo propósito fue el de orientar el debate formulando las preguntas clave para la intervención de cada grupo. La evaluación de los argumentos fue valorada exclusivamente por los grupos GP (grupo proponente) y GO (grupo oponente), los cuales fueron motivo de análisis en el informe de investigación.

Durante la implementación de las técnicas e instrumentos de registro de la información, se obtuvieron producciones escritas y orales, estas últimas registradas mediante grabaciones de audio, que dieron cuenta de las contribuciones tanto individuales como grupales de los participantes de la investigación. En la primera sesión se pidió a los participantes que ubiquen en el diagrama de espacio-tiempo los eventos pasados, presentes y futuros que consideran relevantes a lo largo de su vida, indicando en el eje horizontal la ubicación geográfica o el lugar en donde se desarrollaron los acontecimientos para posteriormente ser unidos a través de segmentos de recta, los cuales conformarán la línea de vida del participante.

Durante la segunda sesión se exploró las formas en cómo los participantes representan en un diagrama de espacio-tiempo situaciones físicas de corte relativista. Para tal propósito se conformaron dos grupos, los cuales tuvieron la connotación de grupo oponente (GO) y grupo proponente (GP), con el

propósito de comunicar al grupo contrario las interpretaciones realizadas de las situaciones físicas propuestas por el investigador, además de mostrar las representaciones construidas en cada uno de los grupos, empleando un diagrama de espacio-tiempo relativista.

Para la tercera sesión se presentó una situación hipotética de corte relativista en la cual los participantes identificaron en un diagrama de espacio-tiempo de Minkowski los eventos que son simultáneos para dos observadores con marcos de referencia diferenciados. Para la cuarta sesión, se presentó una actividad compuesta por dos guías de experimentación mental, cuyo propósito era construir experimentos mentales empleando una guía de procedimientos, en donde se explicitó una serie de fases de experimentación para delimitar de forma clara y efectiva cada uno de los eventos, cantidades físicas, instrumentos y objetos involucrados en dos situaciones de corte relativista que fue objeto de experimentación mental para su resolución.

Finalmente, para la quinta y última sesión, se desarrolló un debate crítico que giró en torno a la segunda situación hipotética desarrollada en la actividad anterior, en donde se distribuyeron los participantes en dos grupos característicos: grupo proponente (GP) y grupo oponente (GO); los cuales defendieron un caso planteado derivado de la situación hipotética, en donde se da apertura al debate y a la revisión de perspectivas en cada uno de los grupos.

5.4 Sistematización y análisis de la información

Con el propósito de sistematizar la información recolectada en las transcripciones y realizar el proceso de codificación que responda a las categorías y subcategorías de análisis, se implementa el siguiente sistema de codificación (Véase tabla 3):

Tabla 3. Sistema de codificación.

Código	Significado
P	Participantes de la investigación. Nombrados por orden alfabético desde el participante PA hasta el participante PL .

CA	Cuestionario Abierto. Nombrados por orden de implementación, por ejemplo: CA-1 (Cuestionario abierto 1) y así sucesivamente.
CC	Cuestionario Cerrado.
GD	Grupo de Discusión. Nombrados por orden de implementación, por ejemplo: GD-1 (Grupo de discusión 1) y así sucesivamente.
GP	Grupo Proponente.
GO	Grupo Oponente.
G.E.M	Guía de experimentación mental. Nombrados por orden de implementación, por ejemplo: G.E.M-1 (Guía de experimentación mental 1) y así sucesivamente.
p. a	Presentación de argumentos por parte de los grupos GP o GO. Nombrados por orden de presentación, por ejemplo: p. a-1 (primer argumento, p.a-2 (segundo argumento) y así sucesivamente.
p. c	Pregunta al grupo contrario.
r. g	Respuesta del grupo GP o GO.
c. c	contraargumento del grupo GP o GO.
s	Situación física. Nombradas por orden alfabético, seis en total. Desde s-a hasta s-f .

Por ejemplo, la codificación (CA-2, GP, PA, s-c) se refiere a la unidad de análisis que corresponde a la situación física c (s-c) del segundo cuestionario en modalidad abierto (CA-2), enunciada por el participante PA que hace parte del grupo proponente GP. Es importante destacar que los códigos corresponden a una unidad de análisis brindada ya sea por un participante como en el ejemplo anterior, o por consenso de todo el grupo, por ejemplo, la codificación (CA-2, GO, s-f), la cual no menciona el código de un participante en específico, se refiere a que la unidad de análisis corresponde a la situación física f (s-f) del segundo cuestionario abierto (CA-2) enunciada por el grupo oponente GO. Otro ejemplo puede ser el siguiente (GD-2, GP, p.a-2), en donde refiere a la unidad de análisis que corresponde al segundo argumento presentado (p.a-2) por el grupo proponente (GP), realizado en el segundo grupo de discusión (GD-2).

Por otro lado, es importante señalar que, posterior a la lectura de las transcripciones, se tomaron en consideración aquellas unidades de análisis que a la luz de la interpretación como investigador se consideraron relevantes para el estudio de acuerdo a las categorías y subcategorías de análisis. Adicionalmente, con el propósito de simplificar las unidades de análisis, centrando la atención en la información relevante se emplea durante la transcripción los siguientes símbolos:

Tabla 4. Simbología empleada en la transcripción.

Código	Significado
[...]	Supresión de una parte de la transcripción original para resumir o centrar la atención en lo relevante.
[]	Comentarios del transcriptor a modo de aclaración.

Para el análisis de la información se emplearon conjuntamente el análisis categorial desarrollado por Cisterna (2005) y el análisis de contenido propuesto por Piñuel (2002). El análisis categorial consiste en la identificación y organización de categorías apriorísticas surgidas del análisis del marco conceptual. Basándose en los diferentes instrumentos de recolección de la información que se utilizarán en la indagación sistemática de la información.

Para los propósitos de la investigación se construyen una serie de categorías apriorísticas que permitirán la clasificación y la interpretación de la información, que como lo afirma Cisterna (2005) “Se identificaron categorías, que denotan un tópico en sí mismo, y las subcategorías, que detallan dicho tópico en micro aspectos. Estas categorías y subcategorías son apriorísticas, es decir, construidas antes del proceso recopilatorio de la información” (p. 64).

Las categorías apriorísticas diseñadas, con sus respectivos índicos, se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 5. Categorías y subcategorías de análisis con los indicios correspondientes.

Categorías	Subcategorías	Indicios
1. La experimentación mental como medio para la construcción de nociones sobre el espacio-tiempo.	1. Rol de las representaciones geométricas en la significación de relaciones sobre el espacio-tiempo.	1. Identificación de variables relevantes en un diagrama de espacio-tiempo relativista: Eventos, líneas de universo, ejes de coordenadas espaciales y temporales. 2. Construcción de experiencias imaginarias para la explicación de un fenómeno físico con connotación relativista. 3. Manipulación de variables y explicación del funcionamiento de mecanismos de la experiencia imaginaria.
	2. Explicación, contrastación y traducción de experimentos mentales relativos al espacio-tiempo.	1. Identificación de variables relevantes para el diseño de un experimento mental. 2. Construcción de inferencias lógicas a las premisas construidas a partir de la experiencia mental. 3. Representación del experimento mental en el diagrama de espacio tiempo relativista. 4. Presentación de puntos de vista a partir de las representaciones de espacio-tiempo relativista.
2. La experimentación mental como escenario para el desarrollo del pensamiento crítico a través de la argumentación.	1. La experimentación mental como escenario para la revisión de perspectivas.	Se recogen los siguientes indicios conforme a los autores Leitao et al. (2016): 1. Afirmación y defensa de ideas propias. 2. Búsqueda de razones y evidencias. 3. Consideración y evaluación ideas contrarias. 4. Volver a un punto de vista para examinarlo.
	2. Experiencias imaginarias como mecanismo para un conocimiento autorregulado y reflexivo.	1. Identificación de argumentos de calidad y su incorporación al pensamiento. 2. Identificación de límites de sus concepciones o perspectivas.

Por otro lado, el análisis de contenido de Piñuel (2002) se enfoca en una serie de procesos interpretativos derivados de producciones comunicativas tales como mensajes, textos o discursos, cuya intención es el procesamiento de datos relevantes de la investigación. Este análisis implica la codificación de los datos a través de la identificación de unidades de análisis (UA), que son fragmentos de texto que contienen información significativa en relación con las categorías previamente identificadas. Para organizar y sistematizar el análisis, se construyó una matriz de análisis que permitió agrupar las UA bajo sus respectivas categorías y subcategorías, facilitando así la identificación de patrones y tendencias.

Tabla 6. Ejemplo de selección de algunas UA para la segunda categoría de análisis.

CATEGORÍA	SUBCATEGORÍA	Unidades de Análisis (UA)		
		INDICIOS O INDICADORES	Cuestionario (CA-2)	Grupo de discusión (GD-2)
2. La experimentación mental como escenario para el desarrollo del pensamiento crítico a través de la argumentación.	1. La experimentación mental como escenario para la revisión de perspectivas.	1. Afirmación y defensa de ideas propias.	(CA-2, GP, s-a).	(GD-2, GP, p.a-2).
			(CA-2, GO, s-b).	(GD-2, GO, p.a-1).
		2. Búsqueda de razones y evidencias.	(CA-2, GP, PC, s-b).	(GD-2, GO, p.a-2).
			(CA-2, GP, PB, s-c).	(GD-2, GP, p.c-1).
		3. Consideración y evaluación de ideas contrarias.		(GD-2, GP, r.g-2)
			(CA-2, GO, PH, s-b)	(GD-2, GP, p.c-2).
			(CA-2, GO, PK, s-b).	(GD-2, GO, r.g-1).
			(CA-2, GO, PG, s-c).	
		4. Volver a un punto de vista para examinarlo.	(CA-2, GP, s-c).	(GD-2, GO, p.c-1).
			(CA-2, GO, PK s-f).	(GD-2, GP, PA r.g-1).

5.5 Criterios de credibilidad

En este apartado se desarrollan los aspectos de triangulación de la información y las estrategias de posible transferencia. El proceso de triangulación se refiere al cruce dialéctico de múltiples fuentes de información que son relevantes al objeto de estudio que surgen a través los instrumentos y técnicas correspondientes, que permiten verificar la validez de los hallazgos, disminuyendo el grado de sesgo investigativo (Cisterna, 2005, p.68).

Siguiendo a Cisterna (2005) en cuanto al proceso de triangulación para el análisis de la información, se empleó como estrategia la triangulación con el marco conceptual, en donde, las

producciones textuales y orales eran categorizadas conforme a los indicios (entendidos como aspectos esperados durante la implementación del estudio, los cuales fueron definidos de acuerdo con las categorías apriorísticas a través del marco conceptual), delimitándose una serie de hallazgos en conversación permanente con el investigador, la perspectiva de los participantes y la mirada de los autores abordados en el marco conceptual. Para realizar la triangulación anterior, se organizaron las UA en una matriz de red de categorías y análisis, donde era posible observar tanto las respuestas de los participantes como las de los grupos de discusión para cada técnica e instrumento empleado.

Por otra parte, se empleó la estrategia de juicio entre pares desarrollado en compañía de expertos, los cuales hacen parte del seminario permanente de la Maestría en educación en Ciencias Naturales y del grupo de investigación ECCE de la Universidad de Antioquia, los cuales validaron los procesos interpretativos de las UA realizados por el investigador, realizando un seguimiento tanto de la coherencia investigativa, como de la rigurosidad en los procesos de análisis.

5.6 Consideraciones éticas

Los principios éticos que guiaron el estudio son: (1) *El respeto por los sujetos de investigación*, el cual como afirma Buendía y Berrocal (2001) es uno de los principios éticos que deben estar presentes en toda investigación cualitativa, haciendo alusión al respeto por la autonomía de los participantes en donde se aboga por el trato a las personas como fines y no como medios. En este sentido, los participantes tuvieron un panorama de la propuesta investigativa y su alcance en el grupo de informantes, “informando a los participantes de los fines que se persiguen con el desarrollo del proyecto, sin ningún tipo de coacción económica o de poder” (Buendía y Berrocal, 2001, p.7). La participación en el informe de investigación se realizó de forma voluntaria sin ningún tipo de obligatoriedad de participación, (2) *Protección del anonimato de los participantes*, en donde, de acuerdo a los autores se exige el anonimato de quienes participan y la confidencialidad por parte del investigador y (4) *que los resultados sean fieles a la realidad de los informantes* en donde los resultados no sean un proceso viciado o manipulado por parte del investigador.

Se aplicó un *consentimiento informado de los participantes de la investigación*, dando la autorización de la recolección del material audiovisual que será exclusivamente para fines académicos. Se

siguieron estrictamente las normativas éticas establecidas por la Universidad de Antioquia (2016) las cuales afirman:

Respetar la propiedad intelectual con el debido reconocimiento según las contribuciones de los actores que llevan a cabo la investigación; verbigracia, coinvestigadores, estudiantes, técnicos y personal auxiliar. Referenciar correctamente el trabajo de otras personas, entidades u organizaciones. El investigador se compromete a no plagiar, copiar o usurpar otras investigaciones y publicaciones. Gestionar el proceso investigativo -desde el protocolo hasta la obtención de los datos y los resultados- como la evaluación ético – científica, con responsabilidad, seguridad, transparencia y veracidad. Difundir los hallazgos de la investigación de manera abierta, completa, oportuna y razonable a la comunidad científica y a la sociedad en general, sin perjuicio de observar la debida reserva frente a información confidencial. Cumplir a cabalidad su papel en la investigación sin abrogarse logros que no se correspondan con las responsabilidades asumidas, ni incurrir en prácticas de suplantación o encubrimiento con el fin de obtener un beneficio para sí o para un tercero (p.2).

Conforme al código de ética de investigación señalado anteriormente, se adecúa el protocolo ético correspondiente al grupo de investigación ECCE, con el propósito de proteger los derechos de los participantes involucrados en el estudio investigativo (Véase apartado de consideraciones éticas en el anexo).

6 Hallazgos

A lo largo del presente capítulo, se enuncian los hallazgos principales del estudio, presentados en términos de las categorías de análisis propuestas, las cuales estructuran y guían el análisis de los datos recolectados. Estas categorías, definidas previamente en el marco teórico son: (1) la experimentación mental como medio para la construcción de nociones sobre el espacio-tiempo y (2) la experimentación mental como escenario para el desarrollo del pensamiento crítico a través de la argumentación. A través de las categorías mencionadas, se pretende proporcionar una comprensión profunda del uso intencionado de la experimentación mental para la comprensión de nociones de espacio-tiempo relativista y el desarrollo de habilidades críticas, en consonancia con los objetivos planteados en la investigación.

6.1 La experimentación mental como medio para la construcción de nociones sobre el espacio-tiempo.

La primera categoría se apoya en los trabajos de autores como Mach (1948), Kuhn (1982) y Mettini (2020), los cuales destacan la importancia de los experimentos mentales para la comprensión de fenómenos físicos, en la medida que ciertas situaciones no pueden ser reproducidas en condiciones reales, además de describir el proceso por el cual el experimentador manipula variables y explica los mecanismos de la experiencia imaginaria a través del uso de diagramas y elementos narrativos. Asimismo, autores como Einstein (1998), Minkowski (2012), Wald (1982) y Levrinin (2000), proporcionan el marco teórico que establece las reglas y principios necesarios para la construcción de diagramas de espacio-tiempo de corte relativista, que para el presente trabajo de investigación servirán de instrumento para la interpretación de elementos narrativos y experimentos mentales. La presente categoría de análisis se divide en dos subcategorías las cuales son: (1) Rol de las representaciones geométricas en la significación de relaciones sobre el espacio-tiempo y (2) Explicación, contrastación y traducción de experimentos mentales relativos al espacio-tiempo, las cuáles serán motivo de análisis a continuación:

6.1.1 Rol de las representaciones geométricas en la significación de relaciones sobre el espacio-tiempo

Esta subcategoría conceptualmente se refiere al uso de diagramas de espacio-tiempo de corte relativista como herramienta representacional de eventos relevantes en el contexto de un fenómeno físico (Minkowski, 2012; Levrini, 2002; Wald, 1982). Este concepto se introduce inicialmente mediante un

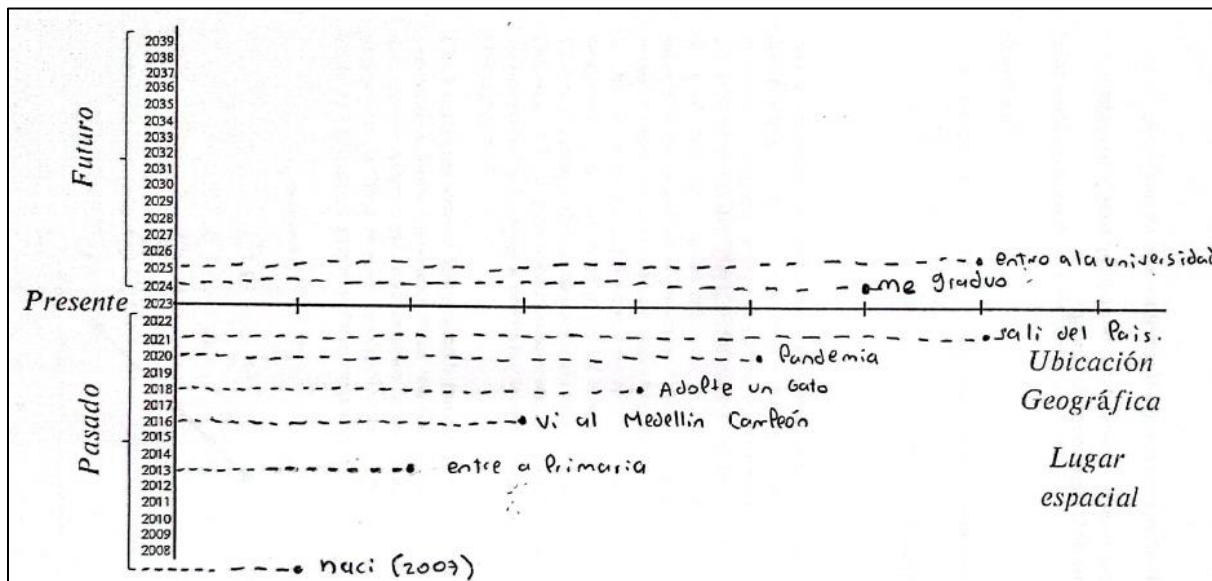
acercamiento en la construcción de diagramas de espacio-tiempo, teniendo un reconocimiento de aspectos clave como los ejes coordenados, la representación de eventos y líneas de universo. Los indicios asociados a esta subcategoría incluyen la identificación de variables relevantes en un diagrama de espacio-tiempo relativista: Eventos, líneas de universo, ejes de coordenadas espaciales y temporales, además de la construcción de experiencias imaginarias para la explicación de un fenómeno físico con connotación relativista; por último, la manipulación de variables y explicación del funcionamiento de mecanismos de la experiencia imaginaria. La información asociada a esta subcategoría fue registrada a través de la modalidad de cuestionario abierto (CA) y cerrado (CC), además de grabaciones de audio y su transcripción correspondiente para identificar con precisión lo que se dijo en cada grupo de discusión (GD), poniendo en consideración las representaciones visuales realizadas por los participantes a través de diagramas de espacio-tiempo relativista y cómo estos son un medio para explicar y representar no solo las narrativas orales y escritas, sino también las experiencias imaginarias elaboradas por los participantes de la investigación.

Durante las tres primeras sesiones de intervención, se desarrollaron tres actividades preliminares en calidad de cuestionario abierto (CA), a fin de permitir que los participantes presentaran de forma inicial una comprensión intuitiva y descriptiva del fenómeno espacio temporal desde un enfoque cualitativo, a través de un primer acercamiento al diagrama de espacio-tiempo relativista en un sistema de coordenadas bidimensional, en donde no sólo se exploró el concepto de evento y línea de universo a través de situaciones cotidianas, sino también sus representaciones geométricas que servirán como andamiaje para la representación de experimentos mentales en actividades posteriores de esta investigación.

En primera instancia, se desarrolla (CA-1) con el fin de acercar a los participantes a la representación del espacio-tiempo desarrollada por Hermann Minkowsky en 1908, a través de situaciones relacionales para el estudiante, definiendo de forma cotidiana un evento como un hecho o eventualidad ocurrida en un tiempo y lugar definidos, y la línea de universo como una línea de vida que integra todos los eventos (pasados, presentes y futuros) del participante. Para estos propósitos se les pide a los participantes que ubiquen en el diagrama de espacio-tiempo los eventos pasados, presentes y futuros que consideran relevantes a lo largo de su vida, indicando en el eje horizontal la ubicación geográfica o el lugar en donde se desarrollaron los acontecimientos para posteriormente ser unidos a través de segmentos de recta, los cuales conformarán la línea de vida del participante. A continuación, se muestran algunas

representaciones realizadas por los participantes, las cuales fueron escogidas con el propósito de cubrir el rango de respuestas comunes dentro del grupo estudiado, en donde se hace una interpretación en concordancia con la teoría de espacio-tiempo y la perspectiva del investigador.

Ilustración 13. Diagrama de la línea de vida del participante PA.

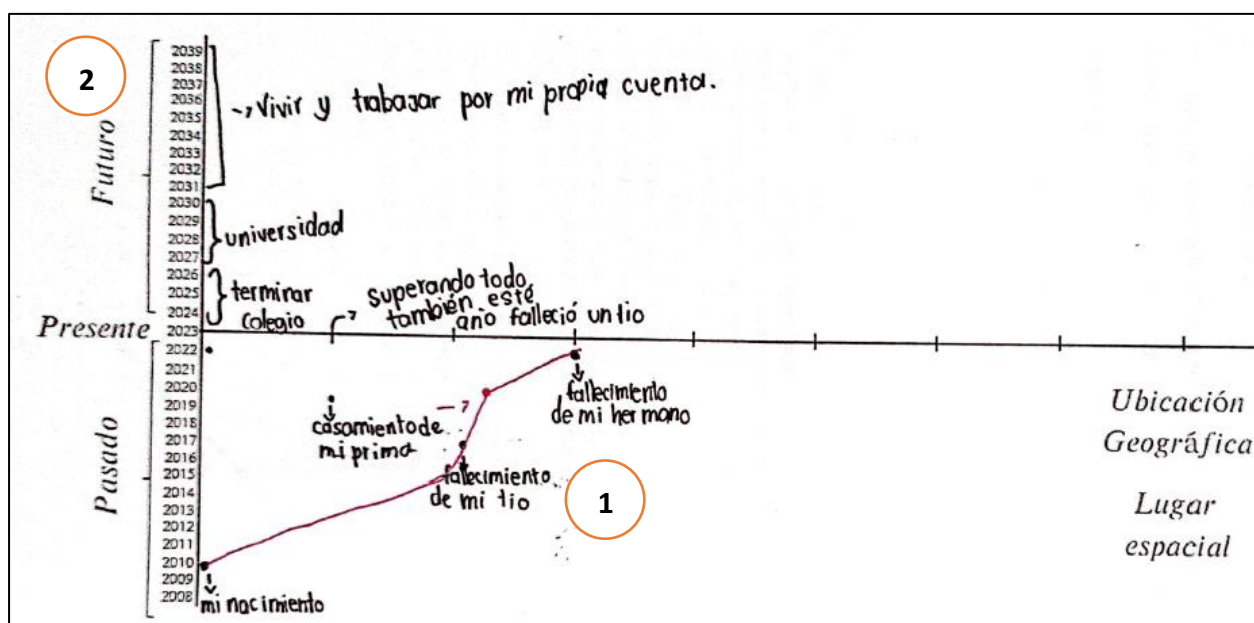


El participante PA presenta una serie de acontecimientos (pasados y futuros) representándolos a través de puntos en el diagrama de espacio-tiempo (véase Figura 13), relacionando cada evento con un tiempo específico en años, sin que estos coincidan. Se evidencia que en el eje espacial no se asigna una ubicación geográfica o lugar espacial definidos para cada evento, que pudiera corresponder a una escala espacial; sin embargo, a medida que los eventos transcurren en el tiempo, su relación espacial se extiende en el eje de abscisas. Asimismo, no se observan eventos que representen el presente del participante, al igual que no representa un conjunto de situaciones en el eje de tiempo, a las cuales atribuye un orden temporal (antes-después), pero sin explicitar ubicación espacial, por lo tanto, sin conexión explícita en el espacio-tiempo.

El participante PB realiza dos representaciones diferenciadas en el diagrama de espacio-tiempo (véase Figura 14). Con el fin de analizar en detalle cada representación, se divide el diagrama de espacio-tiempo en dos regiones: La región (1) corresponde al mundo pasado del participante y la región (2) a su mundo futuro de posibles acontecimientos. En la región (1) el participante PB presenta una serie de

eventos no sólo relacionando cada uno de ellos en un intervalo de un año sin que éstos coincidan, sino también estableciendo una relación de continuidad entre ellos, a través de una trayectoria, cuyos puntos representan en este plano bidimensional tanto una ubicación espacial como una temporal. Si bien esta trayectoria dibujada podría corresponder a lo que Minkowski denomina línea de universo (Minkowski, 2012), el participante PB no explicita las ubicaciones espaciales de los eventos registrados, así que solo se identifica de los eventos su dimensión y orden temporal.

Ilustración 14. Diagrama de la línea de vida del participante PB.

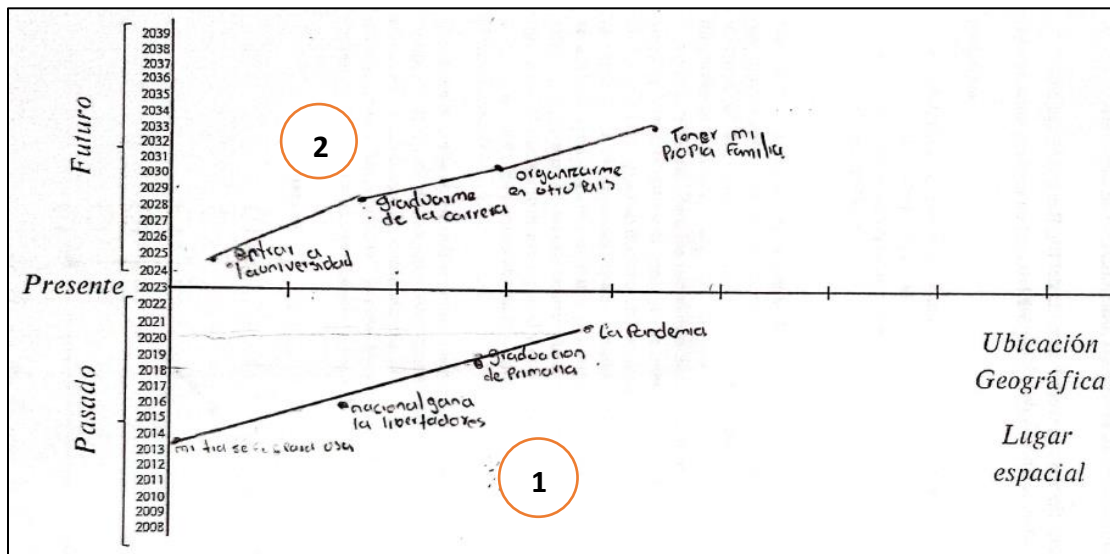


En la región (2) se evidencia que los eventos registrados para el participante PB coinciden con el eje temporal del diagrama, siendo sujetos a una sola ubicación en el eje espacial, por lo cual se infiere que para el P.B, no asocia la idea de evento con una ubicación tanto temporal como espacial. Asimismo, para esta región (2) el participante PB no asocia a los eventos una ubicación temporal específica (punto en el tiempo) sino que los representa como “lapsos” de tiempo (terminar el colegio entre 2004 y 2006), lo que induce a pensar que no se tiene asimilada una idea de evento como un punto en el espacio-tiempo.

El participante PC proporciona la siguiente representación (Véase Figura 15), en donde si bien en ambas regiones los eventos (pasados y futuros) se encuentran relacionados a través de líneas, estas son discontinuas entre sí; adicionalmente, como en el caso anterior, el participante PC no asocia la idea de

evento con una ubicación tanto temporal como espacial. Por lo cual, se pueden inferir las siguientes conclusiones referentes a la discontinuidad en sus líneas de universo: (1) la noción de evento no está bien diferenciada en el diagrama, y (2) no hay permanencia de sujeto (no continuidad entre líneas de vida de pasado y futuro), las dos líneas de vida diferenciadas que se muestran en el diagrama significan dos sujetos cada uno con eventos igualmente diferenciados. En cuanto a la primera conclusión desde una perspectiva teórica del fenómeno espacio temporal, Minkowski afirma que la significación de evento como punto en el espacio-tiempo, y la línea de vida como unión de eventos da cuenta del movimiento del sujeto u observador en el espacio-tiempo (Wald, 1992).

Ilustración 15. Diagrama de la línea de vida del participante PC.



Para una buena comprensión de esto, es menester pensar que el presente del observador corresponde a un instante de tiempo asociado un único eje de coordenadas espaciales. Si consideramos un instante posterior como el presente del observador, su eje espacial tendrá un desplazamiento superior hasta alinearse con los puntos que representan los eventos presentes en el diagrama de espacio-tiempo. Finalmente, la segunda conclusión que se infiere del participante PC en consonancia con la teoría, afirma que la línea de universo se constituye por el conjunto infinito de eventos ocurridos en el pasado, presente y futuro, siendo esta una línea continua que se asocia a un observador (Wald, 1992).

Los participantes PD y PE proponen las siguientes representaciones (Véase Figura 16 y 17), en las cuales presentan una serie de acontecimientos entrelazados que corresponden a las líneas de vida de ambos participantes; se evidencia que para ambos casos cada evento es relacionado temporalmente y asociado a un lugar o espacio definidos. Adicionalmente, se muestra que las dos representaciones presentan un conjunto de sucesos individuales, en donde cada uno se ubica en el espacio-tiempo a través de una descripción espacial y temporal, en donde como afirma Minkowski (2012) se determina una relación de continuidad entre eventos, derivando a un principio de causalidad en el cual un evento independiente de la línea temporal (pasado, presente o futuro) deriva en la consecución de otro.

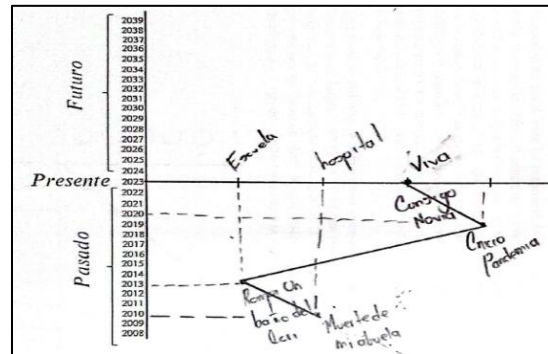
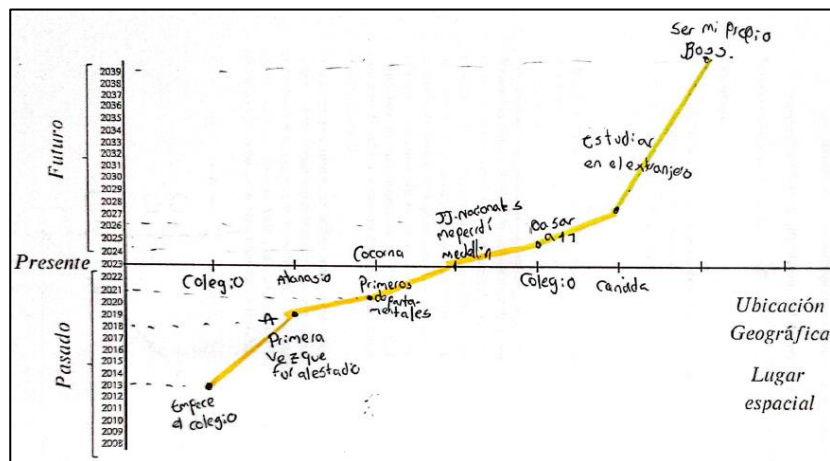


Ilustración 16. Diagrama de la línea de vida del participante PE.

Ilustración 17. Diagrama de la línea de vida del participante PD.



En conclusión, esta actividad preliminar donde se presenta una versión del espacio-tiempo a través de situaciones cotidianas próximas a los participantes, puede ser un andamiaje hacia construcciones más formales en la clase de física. En efecto, siguiendo a Levrini (2002), Minkowski menciona una caracterización del espacio-tiempo en la cual su coexistencia no se genera por sí misma, sino que reside en la representación de conceptos que hacen parte de nuestras experiencias. En consecuencia, la actividad implementada, permitió que los participantes tengan una comprensión intuitiva del espacio-tiempo, la

cual servirá como puente para descripciones más detalladas desde un enfoque geométrico. Otra implicación de la actividad desarrollada es el condicionamiento previo hacia la comprensión del diagrama de espacio-tiempo, que es el escenario en el cual los participantes presentaron sus experimentos mentales, en donde se recogieron los eventos y las explicaciones de las experiencias mentales que se llevaron a cabo de forma individual y colectiva a través de los grupos de discusión.

En segunda instancia, se empleó la actividad preliminar 2 en calidad de cuestionario abierto (CA-2), en donde se exploró las formas como los participantes representan en un diagrama de espacio-tiempo situaciones físicas puestas en consideración. Para tal propósito se conformaron dos grupos, los cuales tuvieron la connotación de grupo oponente (GO) y grupo proponente (GP). En cada grupo de discusión se designó un representante, cuya función principal fue expresar los argumentos consensuados por los miembros de su grupo. Este representante actuó como portavoz, asegurando que las ideas y posturas del grupo fueran presentadas de manera clara y organizada durante las discusiones. Adicionalmente, Los participantes pueden argumentar libremente durante el debate, en donde se dejó constancia de su participación en las unidades de análisis y su codificación correspondiente. Para la subcategoría presentada, el enfoque principal no fue el debate generado en el grupo de discusión (GD-1), sino las interpretaciones que los participantes realizaron acerca del fenómeno abordado y su correspondiente traducción en términos de sus representaciones compartidas del diagrama de espacio-tiempo (Véase Figura 18).

Ilustración 18. Representación de algunas situaciones físicas en un diagrama de espacio-tiempo



A continuación, se muestran las situaciones físicas propuestas y las gráficas teóricas previstas por el investigador, que se espera los participantes representen durante la actividad; estas representaciones

sirven como un marco de referencia para determinar la comprensión de los participantes en cuanto a los fenómenos espacio temporales (véase Figura 19).

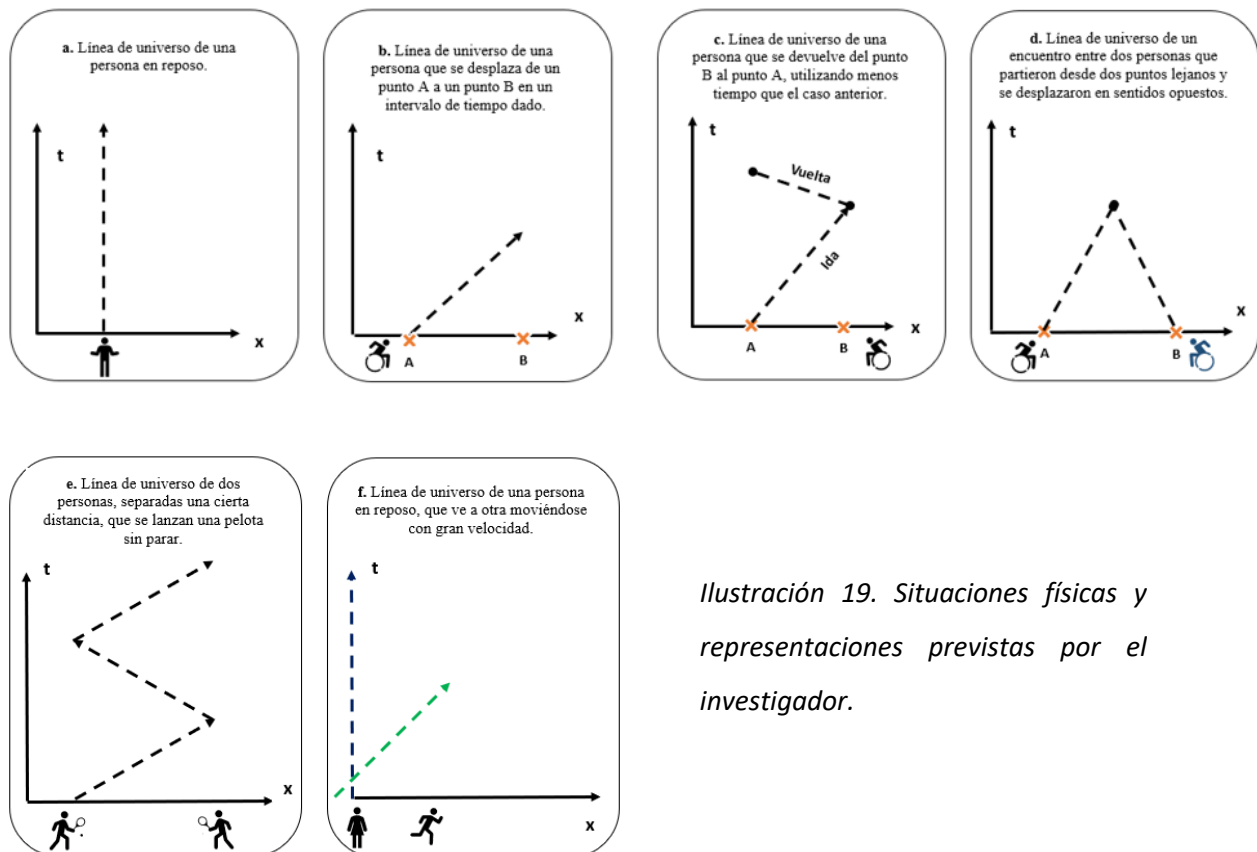


Ilustración 19. Situaciones físicas y representaciones previstas por el investigador.

Conforme a la categoría de análisis, se presentan a continuación, algunas representaciones del espacio-tiempo y sus interpretaciones elaboradas por los participantes en modalidad de debate abierto, las cuales fueron escogidas con el propósito de cubrir el rango de respuestas comunes dentro del grupo estudiado, en donde se hace una interpretación en concordancia con la teoría de espacio-tiempo y la perspectiva del investigador.

En la representación realizada por parte del grupo GP a la situación “a” (Véase Figura 20), afirman que “[...] el tiempo siempre transcurre y al estar el cuerpo estático no recorrerías en el espacio [...]” (CA-2, GP, s-a). Bajo esta afirmación, se evidencia una perspectiva del tiempo de acuerdo al movimiento relativo del cuerpo, en el que una persona en estado de reposo presenta un tiempo de $t = 0$

(considerando dicho registro al inicio de un cronómetro en pausa). Adicionalmente, se evidencia que la línea de universo correspondiente a su estado de reposo es teóricamente el esperado, debido a que el cambio temporal es constante permaneciendo este en $t = 0$. No obstante, en el diagrama se observa que al parecer hubo confusión en el trazado del eje temporal y espacial intercambiándolos entre sí, debido a que como lo afirma Wald (1982), en el diagrama de espacio-tiempo de Minkowski la línea de universo de un observador que permanece en reposo es paralela al eje temporal en donde dichos ejes son ortogonales. En consecuencia, este cambio de orden de los ejes hace que la representación no sea la adecuada bajo la situación planteada.

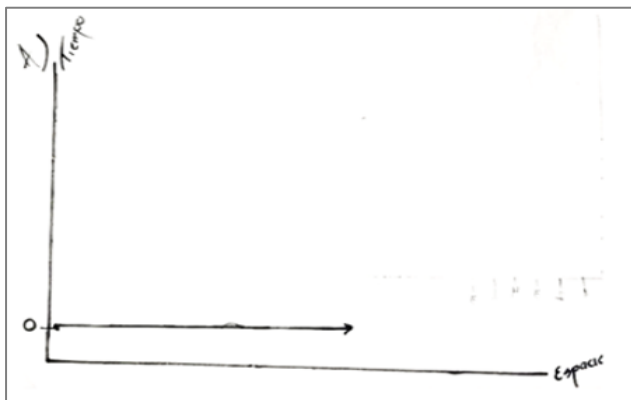


Ilustración 20. Representación de la situación “a” (línea de universo de una persona en reposo) dada por el grupo GP en un diagrama de espacio-tiempo.

A continuación, se muestra la representación de la situación “a” realizada por el grupo GO (Véase Figura 21). En la cual afirman: “[Esta es la] línea de universo de una persona en reposo: No aumenta la distancia, pero si el tiempo [...]” (CA-2, GO, s-a). En donde, se evidencia que el segmento de color rojo representa la línea de universo de una persona en reposo en un diagrama de espacio-tiempo relativista, siendo este paralelo al eje temporal, que de acuerdo con Wald (1982) es la representación esperada desde un punto de vista teórico, presentando una disposición correcta de los ejes de espacio-tiempo.

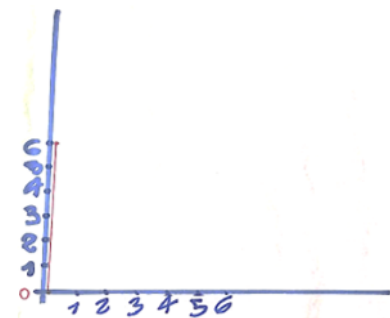


Ilustración 21. Representación de la situación “a” (línea de universo de una persona en reposo) dada por el grupo GO en un diagrama de espacio-tiempo.

El grupo GO proporciona la siguiente representación de la situación “b” (Véase Figura 22), afirmando que “[para describir la línea de universo de una persona que se desplaza de un “punto A” a un “punto B”] pusimos que la persona se

desplazaba del parque al estadio en un tiempo de dos horas y media” (CA-2, GO, s-b). Luego de este enunciado el participante PH del grupo GO añade lo siguiente: “[...] el punto cero está en la casa de la persona [considerando su hipotético estado de reposo relativo, el cual no es representado en el diagrama de espacio-tiempo]”. (CA-2, GO, PH, s-b). De acuerdo a lo anterior se observa que el grupo GO trazó la línea de universo como se preveía teóricamente para la situación física planteada (Véase la figura mencionada 19-b).

Asimismo, la unidad de análisis mencionada evidencia el apoyo de situaciones imaginarias por parte del grupo G.O, como herramienta para la comunicación e interpretación de situaciones físicas; Mach (1948) menciona al respecto que es común experimentar con los pensamientos a través de elementos conservados por el recuerdo y el lenguaje, siendo construcciones mismas de la experiencia. En consecuencia, las experiencias imaginarias son una parte innata de la naturaleza humana, ya sea para la comprensión de conceptos complejos o para su comunicación de forma efectiva.

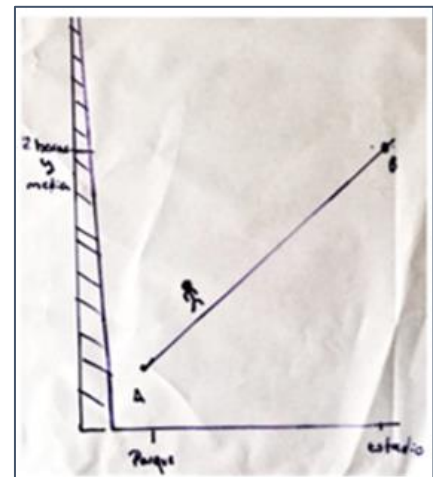


Ilustración 22. Representación de la situación “b” dada por el grupo GO en un diagrama de espacio-tiempo.

La capacidad de imaginar y crear escenarios mentales permite comprender ideas abstractas, anticipar posibles resultados y familiarizarse con las experiencias imaginarias de los demás. Esta situación descrita se relaciona con la presente subcategoría en la medida que, para los propósitos de la investigación, el diagrama de espacio-tiempo relativista es uno de los medios de traducción por el cual se interpreta un fenómeno físico, ya sea a través de un espacio reflexivo personal basándose en su propio proceso de razonamiento, o colectivo mediante el intercambio de ideas y perspectivas con otros, en donde pueden emerger situaciones imaginarias que subyacen de experiencias previas propias de la cotidianidad. En la Figura 23 se muestra la representación realizada por el grupo GO a la situación “c”, en donde afirman que: “[para describir la línea de universo de una persona que se devuelve del punto B al punto A, utilizando menos tiempo que el caso anterior] cogimos otra vez el mismo punto de ahorita que iba del parque al estadio, pero esta vez iba del estadio para el parque” (CA-2, GO, s-c).

De acuerdo a lo anterior, se evidencia en primera instancia que el diagrama de espacio-tiempo construido por el grupo GO no tiene en cuenta el devenir del tiempo, debido a que “regresar” espacialmente lo asocian con devolverse en el eje temporal, cosa que no corresponde a la situación propuesta. Este debe traducirse como un incremento en el eje temporal a medida que ocurren los eventos descritos. En segunda instancia se evidencia que la interpretación presenta, como en el ejemplo anterior, elementos narrativos propios de la imaginación, que permiten la explicación de manera efectiva de diagramas de espacio-tiempo que presentan cierta abstracción. De hecho, las experiencias mentales son procesos primitivos de la mente humana, que permiten la resolución e interpretación de situaciones, en este caso del contexto físico, lo cual es reforzado por declaraciones como las de Mettini (2020), en donde afirma que las experiencias imaginarias permiten construir situaciones derivadas de la experiencia para comprender elementos abstractos del mundo físico, que no pueden ser manipulados en el mundo natural.

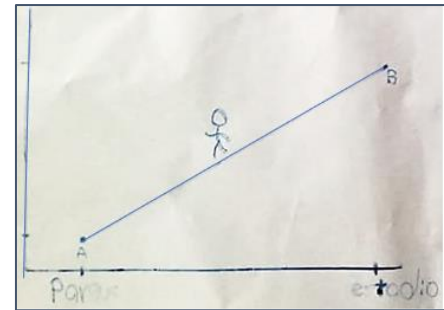


Ilustración 23. Representación de la situación “c” dada por el grupo GO en un diagrama de espacio-tiempo

Las representaciones de la situación “d” realizadas tanto por el grupo GP como por el grupo GO (Véase Figura 24), en donde se desea representar la línea de universo de un encuentro entre dos personas que partieron desde dos puntos lejanos y se desplazaron en sentidos opuestos, fueron similares desde un punto de vista teórico de acuerdo a las representaciones de espacio-tiempo descritas por Wald (1982). La gráfica de movimiento se describe en diagonal, encontrándose en algún punto de la trayectoria por desplazarse en sentidos opuestos. Sin embargo, ambas interpretaciones difieren conceptualmente. El grupo GP argumenta: “Nosotros lo planteamos: Uno sale hacia la izquierda y el otro hacia la derecha y en el centro se encuentran que es lo que nos piden en el ejercicio” (CA-2, GP, s-d). Mientras que el grupo GO afirma: “El personaje sigue subiendo y éste también sigue subiendo, hasta cruzarse” (CA-2, GO, s-d). Ante las respuestas de ambos grupos se evidencia que el grupo GP describe el desplazamiento de ambos sujetos. Conforme a la unidad de análisis presentada, se evidencian habilidades de traducción por parte del grupo GP, en la cual de acuerdo con Boisvert (2004), se percibe una correlación entre las dos formas de presentar la información, asegurando que su transmisión sea de manera fiel y sin pérdida de información, en donde

para estos fines, tanto el diagrama de espacio-tiempo como su interpretación reflejarán la situación física planteada.

Al igual que en las representaciones anteriores, vemos que los diagramas y las interpretaciones construidas por el grupo GO y el grupo GP para representar la situación “e” son similares (Véase Figura 25). El grupo GP afirma: “En el enunciado nos dicen que dos personas en un sitio fijo no dejan de lanzarse una pelota, durante un período de tiempo, ahí estamos presentando que hay una secuencia de las bolas que representa el pase de la “persona A” a la “persona B”” (CA-2, GP, s-e), a su vez el participante PK del grupo GO afirma: “Se tiran una pelota a una distancia de 8 metros, podemos ver que éste le lanza la pelota al otro y se divide 8 metros en 1 segundo (ósea que el personaje la tiró como durito), ya después se la devolvió 8 metros en segundo y medio... Y así sucesivamente, hasta que éste le dio rabia y ya la tiró por encimita y entonces se demoró más tiempo. Y así sucesivamente. Cada vez van cambiando la fuerza del lanzamiento” (CA-2, GO, PK, s-e).

En la interpretación anterior realizada por el participante PK, se observa la intención de plantear una situación hipotética para comunicar asertivamente el diagrama construido por el grupo GO. Su afirmación presenta las condiciones necesarias para ser considerado un experimento mental, debido a que, como lo afirma Norton (1991), no sólo expone una situación hipotética construida por el pensamiento, sino también emplea elementos narrativos que avocan aspectos irrelevantes para la generalidad de los resultados (por ejemplo, expresiones como: “le dio rabia”, o “la tiró como durito”), son aspectos clave en la construcción de un experimento mental. Adicionalmente, se evidencia que las representaciones en el diagrama de espacio-tiempo de ambos

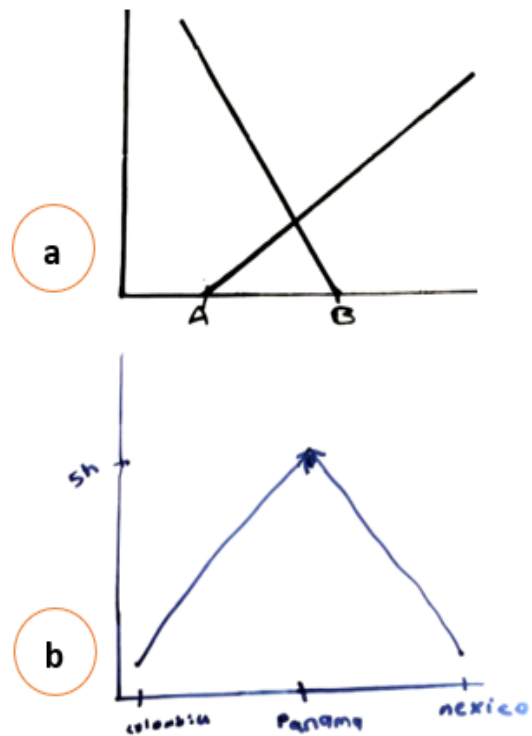


Ilustración 24. Representación de la situación “d” dada por el grupo GP (ilustración a), y dada por el grupo GO, (ilustración b) en un diagrama de espacio-tiempo.

grupos, se limitan a describir la trayectoria de la pelota en forma parabólica sin considerar el devenir del tiempo, aspecto importante para una correcta traducción en el diagrama de espacio-tiempo.

A nivel general, de acuerdo a las representaciones espacio-temporales elaboradas tanto por el grupo GP como por el grupo GO, además de la interpretación de las mismas, se evidencia una serie de aspectos a destacar: (1) *La representación de situaciones físicas en el diagrama de espacio-tiempo*, en donde se observa que un alto número de participantes aplican correctamente el concepto de línea de universo, en la medida que las respuestas coinciden con los resultados teóricamente esperados. (2) *Habilidades de traducción para una fiel representación de una situación física de espacio-tiempo*, en el sentido que los participantes fueron capaces de emplear un lenguaje preciso para explicar de manera efectiva las situaciones físicas propuestas, al traducir dicha situación a un modelo visual que facilite la comunicación de forma clara y precisa, y siendo fiel a la representación realizada. Esta habilidad cognitiva de traducción, como lo afirma Boisvert (2004), es crucial para que, cambiando de representación se mantenga el sentido de lo que se desea transmitir; esta competencia fue alcanzada por la mayoría de los participantes, a causa de la generación de un ambiente propicio, a través del cual diferentes sistemas simbólicos (ya sea discursivos o de representación gráfica) que permitieran la comunicación efectiva del fenómeno físico planteado. (3) *La construcción de experiencias imaginarias para la explicación de un fenómeno físico con connotación relativista*, en donde los participantes de la investigación emplearon situaciones imaginarias con el fin de explicar de manera efectiva las representaciones de espacio-tiempo, en cuyas interpretaciones no sólo atribuían ciertas variables implicadas en el movimiento del cuerpo (por ejemplo, distancia y tiempo de recorrido), sino también la generación de detalles irrelevantes que, como lo afirma Norton (1991), son característicos de la experimentación mental cuyo objetivo es la construcción de un conocimiento del mundo físico mediante un ejercicio del pensamiento (Mettini, 2020).

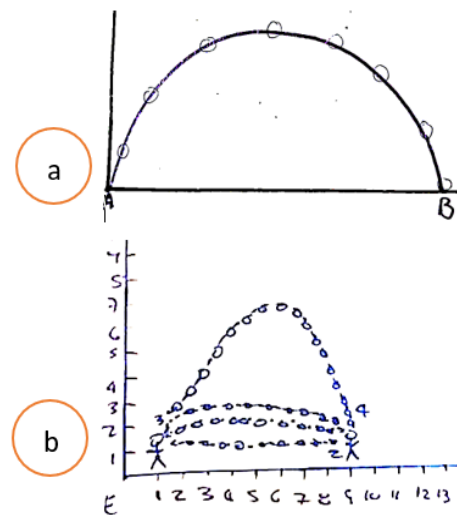
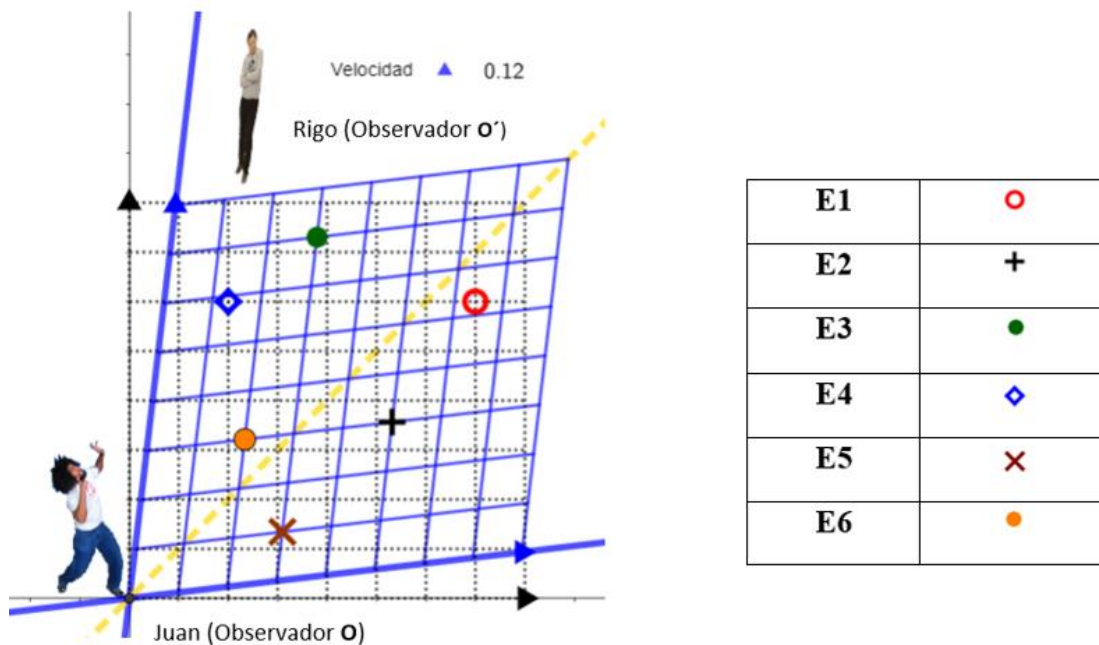


Ilustración 25. Representación de la situación "e" dada por el grupo GP (ilustración a), y dada por el grupo GO, (ilustración b) en un diagrama de espacio-tiempo.

La última actividad preliminar, registrada en calidad de cuestionario cerrado (CC), tuvo como propósito identificar la simultaneidad de dos o más eventos en un diagrama de espacio-tiempo relativista, aspecto crucial para la elaboración de experimentos mentales en el contexto de la TER, debido a que permite la comprensión de la simultaneidad como un fenómeno relativo que depende del marco de referencia del observador y cómo este es representado en un diagrama de espacio-tiempo. Si dos eventos son simultáneos para un observador O en un marco de referencia definido, no necesariamente serán simultáneos en otro marco de referencia que se mueve uniformemente con respecto al primero (Einstein, 1916).

Para tales propósitos, se presentó a los participantes la siguiente situación hipotética: Considere dos observadores, cada uno con un marco de referencia definido; el primero llamado Juan (observador O) que se encuentra en reposo con respecto a la superficie terrestre, mientras que el segundo llamado Rigo (Observador O') que viaja en una nave espacial que presenta una rapidez de $0,12c$, es decir, una rapidez del 12% comparable con la rapidez de la luz. Consideramos teóricamente que la consecuencia de moverse a una rapidez cercana a la de la luz para el observador O', es que sus ejes tanto temporales como espaciales tienden a inclinarse hacia la línea de luz (representada en color amarillo en la Figura 26) a lo cual se denomina como distorsión del espacio-tiempo. Este fenómeno también genera una distorsión del marco de referencia del observador O'; sin embargo, esta distorsión no es perceptible para O', pero sí lo es para O que lo observa desde el reposo. Esta situación hipotética es representada en un diagrama de espacio-tiempo construido en Geogebra (Véase figura 26a), en donde dando clic a la imagen, podemos manipular las velocidades de ambos observadores arrastrando los puntos de flecha del eje de ordenadas. Considerando que ambos observadores contemplan una serie de sucesos nombrados: $E1$, $E2$, $E3$, $E4$, $E5$ y $E6$, que son representados a través de puntos en el diagrama de espacio-tiempo (Véase figura 24b).

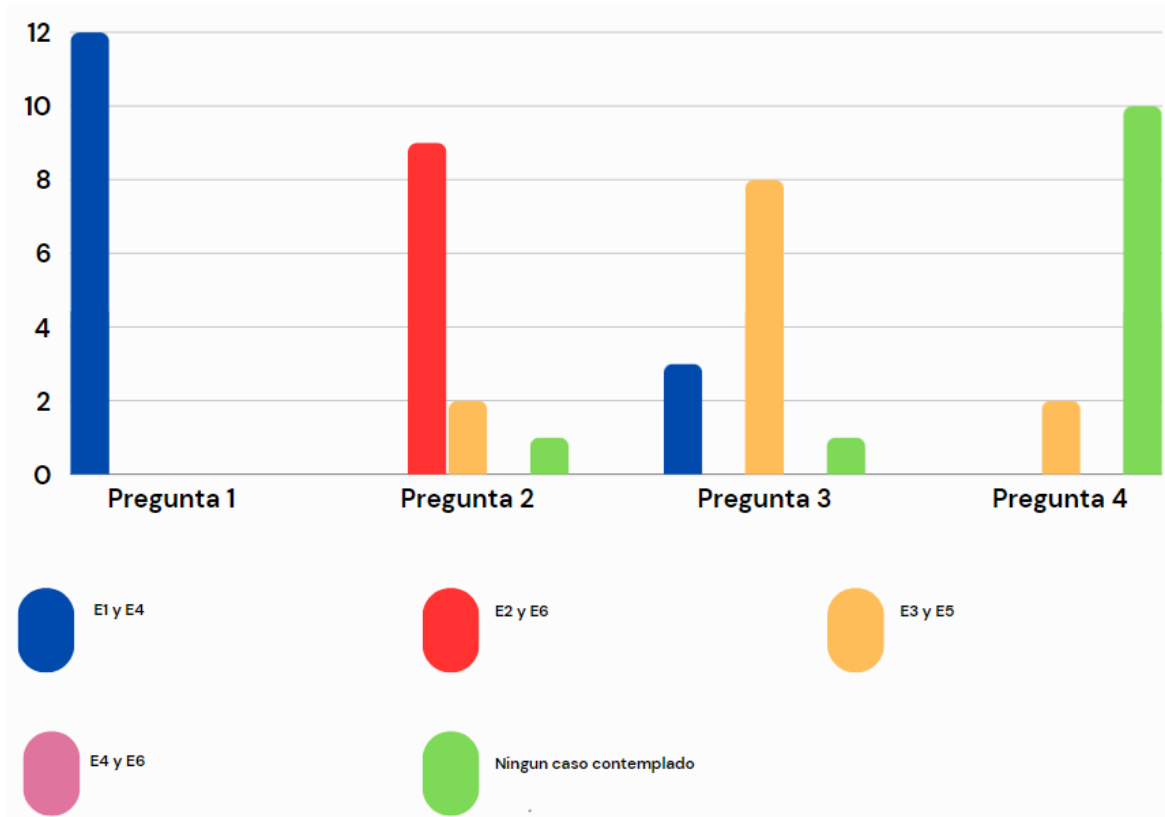
Ilustración 26. A la derecha representación de la situación hipotética en un diagrama de espacio-tiempo relativista. A la izquierda se muestra la representación de los sucesos contemplados.



Fuente: Los personajes empleados son utilizados bajo la licencia CC BY-SA 2.0 de Scratch, disponible en scratch.mit.edu.

Los participantes deben identificar cuáles eventos son simultáneos para ambos observadores, considerando la rapidez de Rigo (Observador O') como $0,12c$. Para tales propósitos se formulan las siguientes preguntas: (1) ¿Cuáles explosiones ocurrieron de forma simultánea (al mismo tiempo) para Juan (Observador O)? (2) ¿Cuáles explosiones ocurrieron de forma simultánea (al mismo tiempo) para Rigo (Observador O')? (3) ¿Cuáles explosiones ocurrieron en el mismo lugar para el marco de Rigo? (4) ¿Cuáles explosiones ocurrieron en el mismo lugar para el marco de Juan? conforme a las respuestas dadas por los participantes se obtuvieron los siguientes datos:

Ilustración 27. Respuestas a las preguntas frente a la simultaneidad de eventos, cuya escala vertical corresponde al número de participantes.



En respuesta a la pregunta 1, todos los participantes afirmaron que los sucesos E1 y E4 son simultáneos para Juan (observador O), respuesta esperada desde un punto de vista teórico, reconociendo que dichos eventos están en la misma línea de tiempo paralela al eje de abscisas, cuyo sistema de coordenadas (de línea punteada) es ortogonal, debido al estado de reposo de Juan; esto en concordancia con las declaraciones de Minkowski (2012), quien afirma que ambos eventos que coinciden en una misma coordenada temporal, son simultáneos con respecto al marco de referencia inercial, en este caso del observador O.

En respuesta a la pregunta 2, nueve participantes afirmaron correctamente que los sucesos E2 y E6 son simultáneos para Rigo (Observador O'), reconociendo que, debido a la distorsión de su marco de referencia, los eventos están en la misma línea de tiempo, siendo paralela a su eje espacial. Por otro lado, dos participantes afirmaron que los sucesos E3 y E5 son simultáneos para Rigo, que a pesar de que los eventos ocurren en el mismo lugar, no ocurren al mismo tiempo; por último, solo un participante afirma que ningún evento es simultáneo para Rigo. De acuerdo a lo anterior, se evidencia que hubo un número

considerable de participantes que identifica el sistema de coordenadas asociado a cada observador, debido a que hay un reconocimiento de los eventos simultáneos conforme a la disposición de los ejes y sus prolongaciones, tomando en consideración la distorsión del marco de referencia de Rigo (Observador O') cuyos eventos simultáneos para él son diferentes a los de Juan (Observador O). Esto va en concordancia con las afirmaciones de Einstein (1916) en donde declara que el concepto de simultaneidad no es absoluto como se pensaba en física clásica, por el contrario, el tiempo entre eventos puede ser diferente en distintos sistemas de referencia conservando la invarianza de las leyes físicas.

En respuesta a la pregunta 3, ocho personas afirman correctamente que E3 y E5 ocurren en el mismo lugar espacial para Rigo, reconociendo que dichos eventos están en la misma línea espacial paralela al eje de ordenadas; tres participantes afirman que E1 y E4 ocurren en el mismo lugar para Rigo, lo cual se infiere que se presentan confusiones en identificar la línea de universo que describe el movimiento de un cuerpo a lo largo del tiempo; por último un participante afirma que ningún evento ocurre en el mismo lugar. Conforme a los resultados obtenidos se observa que hay un reconocimiento de la coincidencia espacial entre eventos en el diagrama de espacio-tiempo, cuyos eventos a pesar de no estar relacionados temporalmente, ocurrieron en la misma coordenada espacial. En respuesta a la pregunta 4, diez participantes afirman correctamente que ningún evento ocurre en el mismo lugar para Juan, mientras que dos participantes afirman que los eventos E3 Y E5 ocurren en la misma coordenada espacial; sin embargo, la respuesta esperada conceptualmente es que conforme el marco de referencia de Juan, dichos eventos no coinciden en el mismo lugar. Se observa que ante las respuestas relacionadas con la ubicación espacial de eventos (preguntas 3 y 4), los participantes realizan una interpretación correcta de las coordenadas espaciales en cada uno de los eventos, atribuyendo a estos una posición espacial en el diagrama de espacio-tiempo que puede ser coincidente o no.

A nivel general, se evidencia que la mayor parte de los participantes reconocen eventos simultáneos en el diagrama de espacio-tiempo, teniendo en cuenta la distorsión espacio temporal del observador O' con respecto a O. Adicionalmente, logran identificar eventos que, a pesar de no ser simultáneos en un marco de referencia dado, estos pueden coincidir en una misma coordenada espacial. Se observa que la manipulación de los ejes espacio temporales en la representación de diagramas de espacio-tiempo, contribuyó a que los participantes identificaran de forma clara el concepto de simultaneidad en el contexto de la TER, teniendo apertura, como lo afirma Bermejo (2013), a generar un

cambio de paradigma frente a la simultaneidad absoluta dominante en la física clásica, en donde, desde una perspectiva geométrica, el sistema de coordenadas cartesianas era representado solamente desde su naturaleza ortogonal. Adicionalmente, para los propósitos de la presente investigación, se considera relevante para la identificación de variables en un diagrama de espacio-tiempo, el reconocimiento del concepto de simultaneidad entre eventos en un contexto relativista, en donde se considera que el tiempo transcurre a diferentes velocidades conforme al movimiento de los observadores cuyos eventos serán simultáneos dependiendo del marco de referencia empleado (Kaku, 2004). Esta significación de relatividad de la simultaneidad ha sido posible precisamente por el uso de los diagramas de Minkowski que, como representaciones graficas del espacio-tiempo, cuando se maneja su semántica, se construyen en una suerte de mediadores (representaciones hermenéuticas) entre los esquemas cognitivos y las experiencias físicas.

6.1.2 Explicación, contrastación y traducción de experimentos mentales relativos al espacio-tiempo.

En este apartado, se presentan los hallazgos relacionados con la subcategoría explicación, contrastación y traducción de experimentos mentales relativos al espacio-tiempo, la cual conceptualmente se refiere a cómo los participantes interpretan una situación hipotética de corte relativista e intentan dar una explicación del mismo a través del uso de experimentos mentales traducidos en diferentes herramientas representacionales como “proposiciones lingüísticas, representaciones visuales, esquemas y diagramas” (Mettini, 2020, p.209), Asimismo, esta subcategoría se refiere a cómo estos medios de traducción facilitan la comprensión del fenómeno a través del uso de habilidades de traducción, razonamiento y organización de la información propuestas por Boisvert (2004), siendo esenciales para identificar los elementos clave de una situación física y su correcta traducción en modelos visuales más precisos. Los indicios asociados a esta subcategoría incluyen la identificación de variables relevantes para el diseño de un experimento mental, construcción de inferencias lógicas a las premisas construidas a partir de la experiencia mental, representación del experimento mental en el diagrama de espacio tiempo relativista y, por último, presentación de puntos de vista a partir de las representaciones de espacio-tiempo relativista. Estos aspectos fueron registrados a través de la modalidad de cuestionario abierto (CA), permitiendo registrar las narraciones escritas y su correspondiente traducción a representaciones visuales empleando diagramas de espacio-tiempo relativista.

Con el propósito de fomentar una comprensión del espacio-tiempo relativista a través de la experimentación mental, se presentó una actividad en calidad de cuestionario abierto (CA-3) compuesto por dos guías de experimentación mental (G.E.M), cuyo propósito era construir experimentos mentales empleando una guía de procedimientos, en donde se explicitó una serie de fases de experimentación para delimitar de forma clara y efectiva cada uno de los eventos, cantidades físicas, instrumentos y objetos involucrados en la situación hipotética de corte relativista que fue objeto de experimentación mental para su resolución.

Las guías (G.E.M) presentaban las siguientes fases: (1) ¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en tu experiencia mental?, (2) ¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes para dar respuesta a la pregunta planteada?, (3) ¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en tu experimento mental? (4) Describo un escenario en dónde ocurrirán los hechos y narra tu experiencia mental. (5) ¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente tu experiencia mental?, (6) Ubica los eventos y líneas de universo que representan tu experiencia mental en un diagrama de espacio-tiempo (dibújalo), (7) De acuerdo con la experiencia imaginaria construida, ¿cuáles son las conclusiones de tu experimento mental que dan respuesta a los objetivos planteados? La primera situación hipotética de corte relativista puesta en consideración es la siguiente:

Ilustración 28. Situación hipotética puesta en consideración para construir un experimento mental.

Actividad: De acuerdo con la situación hipotética planteada en la tabla 1, construye un experimento mental completando cada uno de los ítems que se muestran en la tabla 2 dando respuesta a la situación hipotética planteada: <i>“En el mundo newtoniano podemos alcanzar cualquier objeto en movimiento si nos movemos suficientemente rápido” (Kaku, 2005, p.31).</i> Situación hipotética Un transeúnte en reposo sobre la acera evidencia detenidamente que un policía inicia una persecución a un infractor de tránsito, que se mueve sobre una vía recta superando la velocidad límite permitida. Un breve tiempo después, el transeúnte percibe que el policía rebasa al infractor y le obliga a detenerse. Imagina la situación hipotética que el infractor de tránsito se moviese a la velocidad de la luz (o fuese un rayo de luz emitido por un faro). Teniendo en cuenta estas circunstancias, ¿en qué condiciones el policía podría rebasar al infractor?
--

Para dar respuesta a la situación hipotética planteada, cada participante desarrolló un experimento mental orientado por cada una de las etapas de elaboración hasta llegar a la conclusión deseada. A continuación, se muestran algunas respuestas realizadas por los participantes a cada uno de los ítems de experimentación mental, los cuales fueron escogidos con el propósito de cubrir el rango de respuestas comunes dentro del grupo estudiado, en donde se hace una interpretación de acuerdo con el marco conceptual (referido tanto al espacio-tiempo como a la experimentación mental) y a la posición personal del investigador.

Las respuestas a la pregunta acerca de *¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en tu experimento mental?*, reflejan un reconocimiento de estos en la mayor parte de los participantes, en donde declaran que el policía, el infractor y el transeúnte son las personas involucradas en la situación hipotética. No obstante, el participante PC hace alusión a estos tres elementos en la siguiente narración que será persistente en el desarrollo de su experiencia mental: “Una vendedora de rosas ve que un ladrón le roba a uno de sus clientes y la policía da a la búsqueda de ese ladrón y la mujer ve que lo detiene en una esquina” (CA-3, PC, G.E.M-1.1). Se logra evidenciar que el participante PC plantea una situación imaginaria en donde no sólo da cuenta de los observadores que hacen presencia en cada uno de los eventos descritos, sino también en la elaboración de particularidades (o detalles irrelevantes), que en primera instancia no son esenciales para la solución de la situación hipotética planteada, pero como lo afirma Norton (1991), son una de las condiciones necesarias para que la narración mencionada sea considerada como un experimento mental.

En respuesta a la segunda pregunta acerca de *¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes para dar respuesta a la pregunta planteada?*, se observa que la mayor parte de los participantes afirman que la “velocidad, distancia y tiempo” (CA-3, G.E.M-1.2) son las cantidades que consideran relevantes. El participante PD afirma únicamente a la “velocidad de la luz” (CA-3, PD, G.E.M-1.2) como la cantidad a tener en cuenta, mientras que el participante PC afirma que “[la variable física puesta en consideración es] el tiempo, ya que se daría por el tiempo de reacción del policía y la vendedora” (CA-3, PC, G.E.M-1.2). En la resolución de la pregunta se evidencia que los participantes conforme a sus experiencias previas, identifican cantidades físicas que le son familiares y que han abordado anteriormente en la clase de física, lo cual como lo afirma Kuhn (1982) para el experimentador de pensamiento “nada acerca de la situación imaginaria puede ser

completamente desconocido ni extraño” (p.275), que para el presente caso cada participante demuestra la capacidad de relacionar la situación hipotética planteada con lo previamente aprendido empleando el recuerdo y el lenguaje para construir conexiones significativas.

En las respuestas a la pregunta de *¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en tu experimento mental?* El participante PD, afirma que “el escape del infractor, su salto a la velocidad de la luz y que el policía lo rebase” (CA-3, PD, G.E.M-1.3) son los eventos de gran relevancia, siendo a su vez la respuesta teóricamente esperada con mayor predominancia entre los participantes. Por otro lado, El participante PB afirma que “la persecución de un policía a un infractor de tránsito” (CA-3, PB, G.E.M-1.3) es uno de los sucesos a tener en cuenta. La identificación de los eventos en una situación hipotética de corte relativista es de suma importancia para la construcción de un experimento mental, debido a que no sólo permite organizar la información de los aspectos relevantes del problema, sino que también es crucial para una representación coherente y razonada que dé cuenta de la situación hipotética planteada. Para tales propósitos la organización de la información es una de las habilidades críticas que según Boisvert (2004) permite relacionar conceptos, principios y criterios asociados a una situación particular, en este caso en el ámbito de la física, permitiendo una formulación efectiva de explicaciones del fenómeno estudiado.

En respuesta a la pregunta acerca de *describir el escenario en dónde ocurrirán los hechos y posteriormente narra tu experiencia mental*, el participante PD afirma que “al alcanzar la velocidad de la luz, el infractor se convierte en un espectro de luz y el policía logra rebasarlo convirtiéndose en el vacío mismo y rebasando al infractor” (CA-3, PD, G.E.M-1.4). Se observa que el participante PD concluye que ningún cuerpo podría alcanzar al infractor convertido en rayo de luz, únicamente podría alcanzarlo el espacio mismo que ocupa. Esta interpretación realizada por el participante PD refleja cómo su razonamiento lo condujo a un acercamiento de la segunda ley de la relatividad, la cual afirma que la velocidad de la luz es “velocidad límite” (Einstein, 1917); de hecho, para el participante PD solo el vacío podría alcanzarla (el cual es desprovisto de materia o de propiedades ondulatorias, además de no presentar una cualidad medible referida a la velocidad) confirmando la validez de su respuesta.

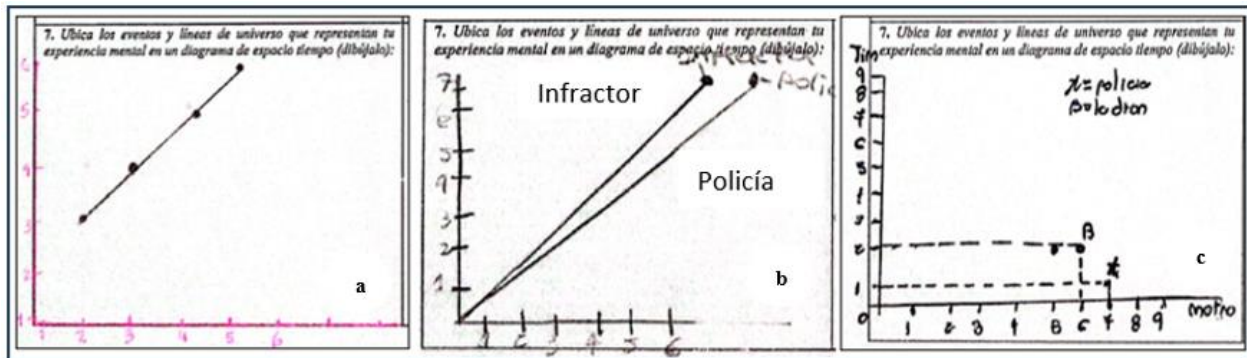
Por otro lado, el participante PC en respuesta a la pregunta afirma que “el escenario ocurre en un barrio no tan peligroso, pero con algunos ladrones. El ladrón pudo tener una pequeña parte para poder escapar, pero fue rebasado por el policía, ¿cómo ocurrió?, por ejemplo, el ladrón recorre una distancia de

6 metros en dos segundos (o minutos) y el policía [una distancia de] 7 metros en 1 segundo (o minutos)” (CA-3, PC, G.E.M-1.4). Se evidencia que en la narración del participante PC existen elementos narrativos que destacan por la creación de un escenario imaginativo como recurso para explicar la situación hipotética planteada, poniendo en consideración situaciones de la cotidianidad como elemento explicativo del fenómeno en cuestión. En efecto, como lo afirma Mettini (2020), los experimentadores pueden derivar conclusiones a través del comportamiento de modelos ideales del fenómeno y extrapolar sus efectos al mundo natural, con el propósito de ser comprendidos y comunicados de manera efectiva. Si bien en la presente unidad de análisis están presentes tales aspectos de la cotidianidad, no hay una relación adecuada de las variables identificadas, o se asumen desde una mirada clásica.

En respuesta a la pregunta acerca de *¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente tu experiencia mental?* se les presentó a los participantes dos principios de corte relativista que podían dar sustento a sus narrativas, los cuales fueron: (1) Las leyes de la física son las mismas para todos los observadores que presentan un estado natural de movimiento (estado de reposo o movimiento en línea recta con velocidad constante) y (2) La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores que presentan un estado natural de movimiento (estado de reposo o movimiento en línea recta con velocidad constante). La mayoría de los participantes coincidieron en que ambos presupuestos a priori enunciados son fundamentales para la construcción del experimento mental. En este sentido, el participante PB afirma “creo que necesitaría de los dos [principios] para hacer un análisis más profundo de la situación [hipotética planteada]” (CA-3, PB, G.E.M-1.5). Por otra parte, el participante PC afirma “[se debe considerar una propiedad] que tiene que depender del tipo de [...] rapidez o velocidad de un objeto A o B [haciendo alusión al policía y el ladrón respectivamente]” (CA-3, PC, G.E.M-1.5). Tomando en consideración las respuestas del participante PC durante la guía de experimentación mental, se observa que, para comprender la situación hipotética planteada, recurre a velocidades ordinarias recreando un escenario cuyo resultado inevitable sea rebasar al infractor, sin considerar los inconvenientes relativistas de que este último se mueva a la velocidad de la luz, presentando un acercamiento clásico del fenómeno. Por el contrario, el participante PD acerca su razonamiento al segundo principio relativista, en donde no contempla en su explicación que un cuerpo rebase al infractor de luz, a excepción del espacio vacío. Ambas posturas se sustentan en base a criterios o leyes (clásicas o relativistas) que como afirma Lipman (2003) permiten la generación de juicios de valor con “responsabilidad cognitiva”, es decir, expresando opiniones con racionalidad respetando principios o leyes que rigen una disciplina científica.

En la siguiente fase de experimentación mental se propone construir un diagrama de espacio-tiempo en donde se ubiquen tanto los eventos como líneas de universo que son relevantes en cada experimento mental de experiencia personal, siguiendo la línea de los participantes mencionados anteriormente, se muestran sus representaciones a continuación:

Ilustración 29. Diagramas de espacio tiempo contruídos por los participantes PB, PD y PC respectivamente.



Conforme a los resultados obtenidos durante el desarrollo de la guía de experimentación mental, el participante PB concluye que “[...] teniendo en cuenta las cantidades físicas que se tuvieron presentes podría decirse que el policía pudo haber tenido la certeza de alcanzar al infractor de tránsito” (CA-3, PB, G.E.M-1.6). De acuerdo a la interpretación realizada por el participante PB como de su representación en el diagrama de espacio- tiempo (véase Figura 29.a) se infiere que, para alcanzar al infractor convertido en un rayo de luz, el policía presenta iguales características que el anterior, teniendo la misma velocidad que el primero; en consecuencia, sus líneas de universo coinciden en cada punto en el espacio-tiempo. Por otro lado, el participante PD afirma que “la situación en la que puede darse este suceso es físicamente imposible” (CA-3, PD, G.E.M-1.6), a pesar de que en el diagrama de espacio-tiempo realizado por el participante PD (véase figura 29.b) ambas líneas de universo comienzan en un mismo tiempo hasta terminar en el encuentro de ambos observadores de forma simultánea. Adicionalmente, conforme al diagrama realizado por el participante PD se infiere el uso del concepto de simultaneidad por la disposición de los puntos que representan las posiciones tanto del policía como del infractor en el diagrama de espacio-tiempo; sin embargo, no hay un cambio adecuado en la transmisión del significado de un sistema simbólico a otro, lo cual es propio de la habilidad de traducción (Boisvert, 2004).

Finalmente, el participante PC menciona a modo de conclusión que “[...] la distancia y el tiempo que se da en la parte de los recuadros varía de su posición, si está a 6 o 7 metros y [varía] el intervalo de tiempo” (CA-3, PC, G.E.M-1.6) (véase Figura 29.c). De acuerdo a lo anterior se evidencia que bajo la interpretación del participante PC el transeúnte conserva la delantera; adicionalmente, se observa que para la transmisión del significado en el diagrama de espacio-tiempo, representa dos eventos detallando sus coordenadas espaciales y temporales, los cuales indican sus posiciones finales durante el recorrido. Por tanto, se concluye que la traducción que proporciona el participante PC en el diagrama de espacio-tiempo es coherente con su explicación, aspecto clave en las habilidades de traducción como es afirmado por Boisvert (2004) en donde el proceso de traducción tiene el propósito de conservar el sentido de lo que se quiere comunicar. La segunda situación hipotética de corte relativista puesta en consideración es la siguiente:

Ilustración 30. Situación hipotética (2) puesta en consideración para construir un experimento mental.

Actividad:

De acuerdo con la situación hipotética planteada en la tabla 1, construye un experimento mental completando cada uno de los ítems que se muestran en la tabla 2 dando respuesta a la situación hipotética planteada:

Situación hipotética 2

Un astronauta y un viajero espacial se encuentran en el espacio exterior, con la preocupación de que sólo queda un tanque de oxígeno para volver a la tierra, por lo cual hacen una apuesta de vida o muerte, cada uno con la seguridad de ganar la apuesta. Consiste en que el primero que impacte un rayo de luz a una lámina de metal dispuesta verticalmente a miles de kilómetros de distancia podrá disponer del tanque de oxígeno. Ambos iniciarán en el mismo punto y un observador les dará la orden de salida. Sin embargo, en el inicio de la carrera, el astronauta se encontrará en reposo y únicamente podrá emitir el rayo de luz, mientras que el viajero espacial dispondrá de la nave para desplazarse hacia la lámina de metal y en el mismo instante en que emita el rayo, encenderá la nave en búsqueda de la lámina. Habrá un segundo observador que estará ubicado al lado de la lámina para saber que rayo impactó primero, vale aclarar que el rayo de cada uno es de diferente color, por lo cual se sabrá el ganador con certeza. ¿Quién ganará la apuesta?, ¿Por qué?

Para dar respuesta a la situación hipotética planteada, se emplea el mismo procedimiento anterior haciendo uso de las etapas de experimentación mental:

Ante la pregunta de *¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en tu experiencia mental?* el participante PB declara que tanto el astronauta como el viajero son los personajes involucrados en la situación hipotética, siendo la respuesta con mayor predominancia entre los participantes. Sin embargo, el participante PA atribuye esta cualidad a objetos materiales, afirmando que tales objetos son: “Nave, tanque, emisor de luz y lamina refractora” (CA-3, PA, G.E.M-2.1). Por otro lado, el participante PC apoya su respuesta con la siguiente afirmación: “[Existen dos condiciones] condición 1 viajero: El rayo de luz morado varía su distancia y [...] el momento que se tarde la luz. Condición 2 astronauta: El rayo de luz y la condición que utilice [...] tiempo y distancia” (CA-3, PC, G.E.M-2.1). El ejercicio anterior permitió la identificación de los personajes y elementos involucrados en la situación hipotética, y cómo éstos interactúan entre sí. En efecto, esto último se evidencia en las respuestas del participante PC, en donde asocia el movimiento de los rayos de luz a cada observador y cómo las variables asociadas a su movimiento (tiempo y distancia) varían conforme al estado de movimiento de estos. Lo anterior se atribuye a la habilidad de organización de la información, la cual, como lo afirma Boisvert (2004), es crucial para una comprensión adecuada de la situación estudiada y la formulación efectiva de explicaciones que aborden las variables clave del problema.

Las respuestas a la pregunta de *¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes para dar respuesta a la pregunta planteada?*, se observa que la mayor parte de los participantes afirman que la distancia y el tiempo son las cantidades que consideran relevantes en el desarrollo de la situación hipotética. El participante PA, además de considerar las cantidades antes mencionadas, considera a la refracción de la luz como un concepto esencial en el desarrollo de su experimento mental. Por otro lado, el participante PC responde a la pregunta asignando valores a las dos condiciones que estableció en la pregunta anterior: “Condición 1: tiempo del viajero en el que prendió el rayo de luz o distancia (ejemplo: 2 segundos antes, distancia: 80 metros). Condición 2: Varía su tiempo y distancia (1 segundo después, distancia: 50 metros)” (CA-3, PC, G.E.M-2.2). De acuerdo a las respuestas anteriores, se observa que los participantes PA y PC emplean situaciones relacionadas con su propio contexto, además de utilizar conceptos clave previamente estudiados en la clase de física; de hecho, el razonamiento entendido como una habilidad cognitiva del pensamiento, promueve el vínculo entre experiencias a nivel personal y conocimientos previos, facilitando la comprensión del nuevo conocimiento, en donde, “al partir de lo que se conoce, razonar permite descubrir las cosas suplementarias que se pueden añadir [estableciendo relaciones con el objeto estudiado]” (Boisvert, 2004, p.39).

Las respuestas a la pregunta de *¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en tu experimento mental?*, el participante PA, presenta dos eventos relevantes: “El viajero que se mueve para llegar a la lámina y el astronauta estático”. (CA-3, PA, G.E.M-2.3). Mientras que el participante PC plantea tres eventos, los cuales son diferenciados por tres momentos narrativos: inicio, nudo y final. Los cuales son: 1. “[el] inicio que fue la apuesta por el tanque [de oxígeno]”, 2. “[El] Nudo cuando los rayos [de luz] están a la mitad del camino” y 3. “[El] Final, porque nos muestra quién ganó la apuesta” (CA-3, PC, G.E.M-2.3). El ejercicio anterior permite suprimir información irrelevante, optimizando el análisis del problema y evitando distracciones innecesarias, a lo cual Mettini (2020) denomina como supresión de información irrelevante, que tiene el propósito de elaborar un modelo mental simplificado para abordar un problema de forma más accesible, además de facilitar el tratamiento de problemas con mayor complejidad.

En respuesta a la pregunta acerca de *describir el escenario en dónde ocurrirán los hechos y posteriormente narrar tu experiencia mental*, el participante PA afirma que “el viajero logró recibir la luz, porque desde el plano de referencia de él se vio diferente” (CA-3, PA, G.E.M-2.4). De acuerdo a lo anterior, y las respuestas previas que proporciona el participante PA, se infiere que la lámina “refractora” (como así la denomina el participante PA) en la cual inciden los rayos de luz posee propiedades tanto refractantes como reflectantes, permitiendo que cada observador pueda visualizar su rayo de regreso. Adicionalmente, refiere el concepto de marco de referencia diferenciado para ambos observadores, reconociendo que el estado de movimiento de un cuerpo dependerá de su sistema de referencia (Einstein, 1998). En efecto, el sistema de referencia del astronauta en reposo observa la distorsión espacio temporal del viajero en la hipotética situación de que la velocidad de la nave se acerque a la velocidad límite de la luz y así recíprocamente el viajero observa esta distorsión en el astronauta.

En respuesta a la pregunta *¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente tu experiencia mental?* también hubo predominancia por parte de los participantes en que ambas propiedades a priori enunciadas para la construcción del experimento mental son fundamentales. El participante PC menciona que “la más importante sería la (1), porque se aplica para todos los observadores [presentando un] estado neutral y con un movimiento recto” (CA-3, PC, G.E.M-2.5), mientras que el participante PA menciona específicamente que “la teoría no inercial y la relatividad fundamental” (CA-3, PA, G.E.M-2.5) son las propiedades a ser tenidas en cuenta. Por lo anterior se observa que el participante PC reconoce que no hay un observador privilegiado, y que las leyes de la física son iguales para todos los

observadores. Como lo afirma Einstein (1904), las leyes de la física conforme a las cuales cambian los estados de los sistemas físicos, no dependen de los sistemas de referencia inerciales. Por otro lado, el participante PA aboca términos que le son familiares a la relatividad (como la teoría no inercial), pero sin dar una explicación que sustente tales afirmaciones.

Como en el ejemplo anterior, se propone construir un diagrama de espacio-tiempo en donde se ubiquen tanto los eventos como líneas de universo que son de gran relevancia para cada experimento mental, siguiendo la línea de los participantes mencionados anteriormente, se muestran sus representaciones a continuación (Véase figura 31):

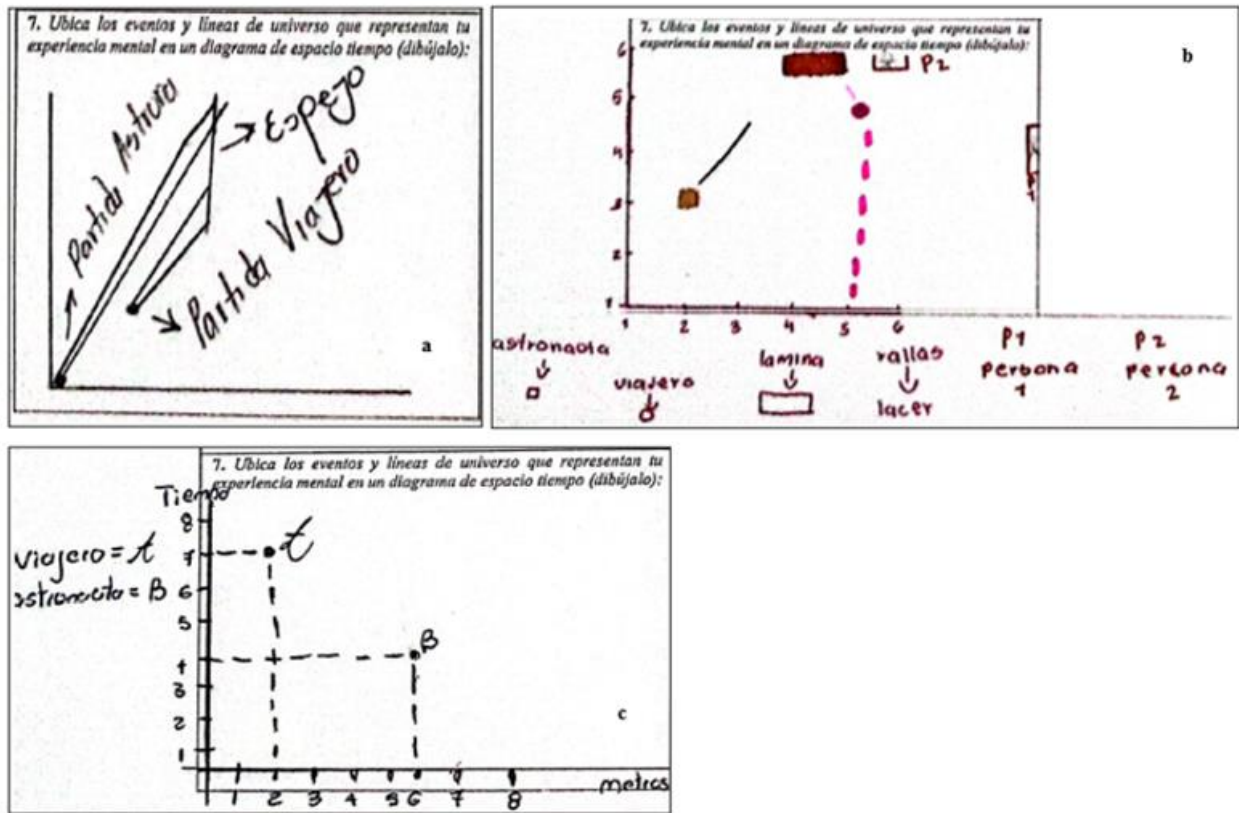


Ilustración 31. Diagramas de espacio-tiempo contruidos por PA, PB y PC respectivamente.

Conforme a los resultados obtenidos durante el desarrollo de la guía G.E.M, el participante PA proporciona la siguiente representación de la situación hipotética (Véase Figura 31.a), en la cual se evidencia que el viajero y el astronauta no emitieron su rayo de luz de forma simultánea y tampoco en el

mismo punto espacial; adicionalmente, conforme a sus respuestas anteriores, se infiere que los rayos de luz que proyectan ambos observadores inciden en la lámina “refractora” (CA-3, PA, G.E.M-2.6), reflejándose posteriormente hacia los observadores. Por otra parte, el participante PB complementa su representación (Véase figura 31.b), afirmando que “[...] según mi experiencia sería el hecho de que el viajero puede ganar por su corta distancia, pero no quita que el astronauta pueda ganar” (CA-3, PB, G.E.M-2.6). De acuerdo a lo anterior se observa que para el participante PB el viajero presenta ventaja, debido a que se desplaza hacia la lámina, por lo tanto, su rayo incide primero que el del astronauta en estado de reposo. Finalmente, el participante PC afirma que “la conclusión de mi experimento mental es que depende de la reacción que tengan los dos, tiempo, etc. O podríamos decir, uno ganó por su rapidez [viajero espacial] o el otro porque el rayo llegó más rápido [astronauta]” (CA-3, PC, G.E.M-2.6). Se observa que los participantes estudiados en el presente apartado emplean elementos narrativos que fueron apropiados previamente en su lenguaje, para la explicación de sus escenarios imaginativos. En efecto, como afirma Kuhn (1982) una de las condiciones para llevar a cabo un experimento imaginario es que esté sujeto a una cuestión de verosimilitud, en el cual el científico pueda aplicar los conceptos y hechos empíricos aprendidos de antemano para la construcción del escenario imaginativo.

En general, las presentes guías G.E.M contribuyeron a organizar la información, permitiendo la identificación de elementos clave en la situación hipotética de corte relativista como: objetos, instrumentos, observadores involucrados y eventos del problema, los cuales son importantes para llegar a la conclusión deseada. Adicionalmente, estas guías permitieron fortalecer la habilidad de organización de la información, debido a que proporcionaron un escenario en el cual los participantes clasificaran y priorizaran información relevante de forma lógica y coherente, facilitando una comprensión clara y precisa del fenómeno físico. Además de representar en diagramas de espacio-tiempo los experimentos mentales con el propósito de fortalecer habilidades de traducción y como medio de apoyo para la confrontación y defensa de opiniones que será motivo de análisis en la siguiente categoría. No obstante, la mayoría de los participantes no representaron adecuadamente la situación hipotética en el diagrama de espacio-tiempo; esto pudo ser debido a que los razonamientos presentados corresponden al teorema clásico de adición de velocidades que afirma combinar las velocidades de dos cuerpos en movimiento relativo; sin embargo, tal razonamiento es insostenible para la física relativista de Einstein (1998), debido a que la luz no depende del movimiento del emisor que la produce.

6.2 La experimentación mental como escenario para el desarrollo del pensamiento crítico a través de la argumentación

La segunda categoría se apoya en las contribuciones de autores como Norton (1991) y Rips (1998), quienes definen la experimentación mental como un argumento, el cual es validado por otras personas en un contexto particular a través de un ejercicio conversacional o dialéctico, siendo un andamiaje para el desarrollo de habilidades críticas, tales como: la flexibilidad de pensamiento, la autorregulación y la revisión de perspectivas; asimismo, se fundamenta en aquellos aspectos que son inherentes al pensamiento crítico y que son abordados por autores como Boisvert (2004), Lipman (1991), Leitao, Del Chiaro & Cano (2016), que son recogidos en el presente trabajo de investigación. La presente categoría de análisis se divide en dos subcategorías las cuales son: (1) La experimentación mental como escenario para la revisión de perspectivas y (2) Experiencias imaginarias como mecanismo para un conocimiento autorregulado y reflexivo. Las cuáles a continuación serán motivo de análisis:

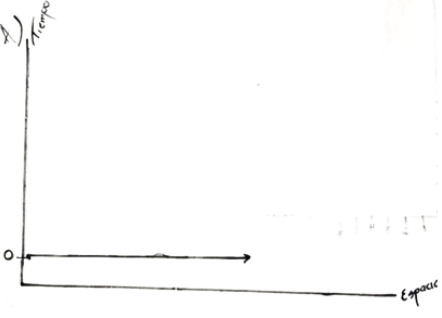
6.2.1. La experimentación mental como escenario para la revisión de perspectivas.

Esta subcategoría hace alusión a cómo la experimentación mental, entendida como argumento (Norton, 1991), está sujeta a un proceso de revisión de perspectivas, que implica la confrontación de posiciones dentro de un marco de razonabilidad (de disposición al cambio); en tal proceso, como lo afirma Leitao (2012), los participantes evalúan hasta qué punto sus afirmaciones pueden resistir a una oposición, o si por el contrario estos argumentos deben ser modificados o inclusive abandonados. Según la autora, este proceso de revisión de perspectivas conlleva al desarrollo de la habilidad crítica denominada *flexibilidad de pensamiento*, la cual promueve una transformación en la forma en cómo se interpreta la realidad entendida como formas de conocimiento. Los indicios asociados a esta subcategoría incluyen la afirmación y defensa de ideas propias, búsqueda de razones y evidencias, consideración y evaluación ideas contrarias y volver a un punto de vista para examinarlo. Las unidades de análisis asociadas a esta subcategoría fueron registradas a través de la modalidad de cuestionario abierto (CA), además de grabaciones de audio y su transcripción correspondiente para registrar con precisión lo que enunciaba cada grupo de discusión (GD), poniendo en consideración las representaciones visuales realizadas por los participantes a través de diagramas de espacio-tiempo relativista y cómo estos son un medio para explicar y representar, no solo las narrativas orales y escritas, sino también las experiencias imaginarias.

A través de la segunda actividad preliminar realizada en modalidad de cuestionario (CA-2), se registraron una serie de argumentos a favor y en contra expuestos en modalidad de debate abierto. Estas representaciones y debates realizados durante el desarrollo de la actividad, reflejan las diferentes perspectivas y comprensiones de los participantes frente a la representación de situaciones físicas en un diagrama de espacio tiempo y las nociones clásicas y relativistas que los participantes pueden aportar en defensa de sus argumentos. Para tal propósito se conformaron dos grupos, los cuales tuvieron la connotación de grupo oponente (GO) y grupo proponente (GP), en el cual se analizaron los argumentos de cada grupo en defensa de las representaciones realizadas para las situaciones físicas planteadas por parte del investigador (Véase Figura 19 del apartado 6.1.1). En cada grupo de discusión se designó un representante, cuya función principal fue expresar los argumentos consensuados por los miembros de su grupo. Este representante actuó como portavoz, asegurando que las ideas y posturas del grupo fueran presentadas de manera clara y organizada durante las discusiones. Adicionalmente, Los participantes pueden argumentar libremente durante el debate, en donde se dejó constancia de su participación en las unidades de análisis y su codificación correspondiente.

En la representación realizada por parte del grupo GP a la situación “a” (Véase Figura 32), se muestra una perspectiva del tiempo de acuerdo al movimiento relativo del cuerpo, en el que una persona en estado de reposo presenta un tiempo de $t = 0$ (considerando dicho registro al inicio de un cronómetro en pausa). Vemos que en la interpretación del grupo GP se presentan dos perspectivas de comprensión de la situación física: (1). El grupo GP argumenta: “[...] el tiempo siempre transcurre y al estar el cuerpo estático no recorrerías en el espacio [...]” y (2) “[...] el cuerpo nunca está en reposo, puesto que siempre va a estar en una órbita en un planeta” (CA-2, GP, s-a).

Ilustración 32. Representación de la situación “a” (línea de universo de una persona en reposo) dada por el grupo GP en un diagrama de espacio-tiempo (al lado izquierdo) y la discusión alrededor del diagrama (al lado derecho).

Diagramas de espacio-tiempo elaborados por GP y GO	Discusión
GP: Situación a. Línea de universo de una persona en reposo. 	1. Interpretación de la gráfica situación a del G.P: “La gráfica, está “al revés”, pero, el tiempo siempre transcurre y al estar el cuerpo estático no recorrerías en el espacio, aunque, si tomamos el tema de una forma más... fuera de lo que estamos viendo cómo espacio: el cuerpo nunca está en reposo, puesto que siempre va a estar en una órbita en un planeta”. 2. Contraargumento del participante H del G.O: “Usted sabe que el espacio siempre se está expandiendo, entonces, siempre tiene que ir aumentando”. 3. Respuesta del participante E del G.P: “Obvio, pero ahí está en reposo mi amigo”. 4. Contraargumento del participante H del G.O: “Si fuera así, tuvieron que haber hecho la recta en diagonal, porque el tiempo sigue aumentando, tendría que hacer el tiempo... Poniendo años, meses o segundos”.

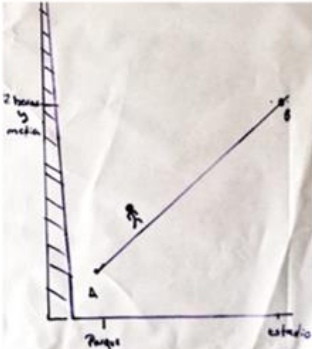
Se observa que se expone indirectamente la noción de sistema de referencia, en el cual se considera que el estado de movimiento de un cuerpo dependerá de su marco de referencia inercial. Durante la discusión se observa que el participante PH del grupo GO presenta el siguiente contraargumento al diagrama realizado por el grupo GP “[Si se está representando una persona en reposo] tuvieron que haber hecho la recta en diagonal, porque el tiempo sigue aumentando, tendría que hacer el tiempo poniendo años, meses o segundos” (CA-2, GO, PH, s-a).

La interpretación realizada por el participante PH del grupo GO evidencia que el tiempo transcurre a pesar del estado de reposo del cuerpo, en donde se infiere que el tiempo es una cantidad absoluta la cual es independiente del cambio, es decir, un tiempo que transcurre en ausencia de movimiento. Por último, se evidencia que el participante PH amonesta a que el grupo GP indique intervalos de tiempo ordinarios (como años, meses o segundos), mediciones características de una medida sensible y externa que emplea un instrumento de medida. El intercambio de opiniones expresado anteriormente, presenta características propias de la argumentación, en donde, como lo afirma Leita0 (2009), se presenta como una actividad discursiva (desde un encuentro verbal) y cognitiva (mediada por un razonamiento y un análisis crítico de diferentes opiniones o perspectivas), que permite la construcción de un conocimiento científico a través de un encuentro permanente de ideas y opiniones, en donde se propende la formulación de razones que las respalden y a la valoración de perspectivas contrarias.

La siguiente unidad de análisis, presenta los argumentos y contraargumentos de ambos grupos para la interpretación de la situación “b” (Véase Figura 33). El grupo GO afirma que “[para describir la línea de universo de una persona que se desplaza de un “punto A” a un “punto B”] pusimos que la persona se

desplazaba del parque al estadio en un tiempo de dos horas y media” (CA-2, GO, s-b). Ante la interpretación del grupo GO, el participante PC del grupo GP contraargumenta lo siguiente: “lo que estoy viendo ahí, es que parten desde el metro 1 y el segundo 1, es decir, ya pasó distancia y tiempo antes de que el personaje arrancara [en el cual suponen el origen de coordenadas como el inicio del movimiento]” (CA-2, GP, PC, s-b). En su defensa, el participante PH del grupo GO menciona que “[En la situación física planteada] Ahí no dice que [la persona en el punto A] estaba en reposo [...]” (CA-2, GO, PH, s-b). y su compañero del grupo GO complementa lo siguiente: “[...] el punto cero está en la casa de la persona [considerando su hipotético estado de reposo relativo, el cual no se tiene en cuenta en la situación planteada interpretada por el grupo GO]” (CA-2, GO, PK, s-b). En el anterior intercambio de ideas se observa que el contraargumento del grupo GP, permitió ampliar el panorama sobre la situación imaginaria planteada en términos del punto de partida del sujeto en cuestión, poniendo en consideración aspectos relevantes del problema que inicialmente no se preveían contemplados en la interpretación del grupo GO. Esto va en la misma perspectiva de autores como Romero, Henao & Barros (2013) en el contexto de la argumentación, quienes afirman que a través de prácticas dialógicas se construyen puntos de vista y explicaciones que pueden ser apoyadas o refutadas, lo cual permite la generación de conocimiento mediante la interacción entre pares.

Ilustración 33. Representación de la situación “b” dada por el grupo GO en un diagrama de espacio-tiempo (al lado izquierdo) y la interpretación del diagrama (al lado derecho).

GO: Situación b. Línea de universo de una persona que se desplaza de un “punto A” a un “punto B” en un intervalo de tiempo dado. 	1. Interpretación de la gráfica situación b del G.O: “Pusimos que la persona se desplazaba del parque al estadio en un tiempo de dos horas y media”. 2. Contraargumento del participante C del G.P: “Lo que estoy viendo ahí, es que parten desde el metro 1 y el segundo 1, es decir, ya pasó distancia y tiempo antes de que el personaje arrancara”. 3. Respuesta del participante H del G.O: “Ahí no dice, que estaba en reposo mi hermano”. 4. Respuesta del participante K del G.O: “El parque no está en el punto cero, en el punto cero está la casa de la persona”. 5. Contraargumento del participante A del G.P: “Pero ahí nos están diciendo que se parte del punto A, que equivale al punto cero, al punto de partida”. 7. Contraargumento del participante D del G.P: (interrumpe abruptamente) “... Siendo el punto A el punto cero”. 8. Exclamación del G.O: “Nooo, no”. 9. Exclamación del participante L del G.O: “Para usted el punto siempre se tomaría como cero”.
--	--

De acuerdo a lo anterior, se infiere que los participantes del grupo GP, asumen el origen de coordenadas como el inicio de todos los eventos físicos; en efecto, en la interpretación de la situación “b” (véase Figura 34) el grupo GP afirma: “En el caso número dos nos proponen que está del punto A al punto B, en un tiempo predeterminado, entonces podemos ver que la recta parte desde el segundo cero y desde el espacio cero, hasta el punto de espacio 1 y tiempo 1. Al llegar a este punto el cuerpo entra en reposo y por eso se establece esta fase” (CA-2, GP, s-b).

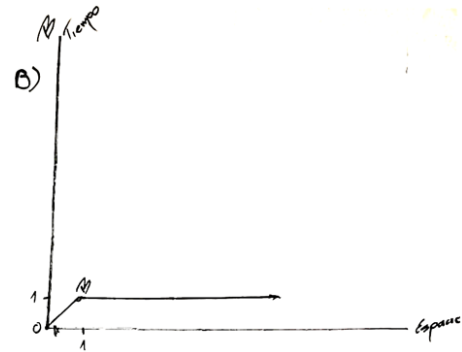


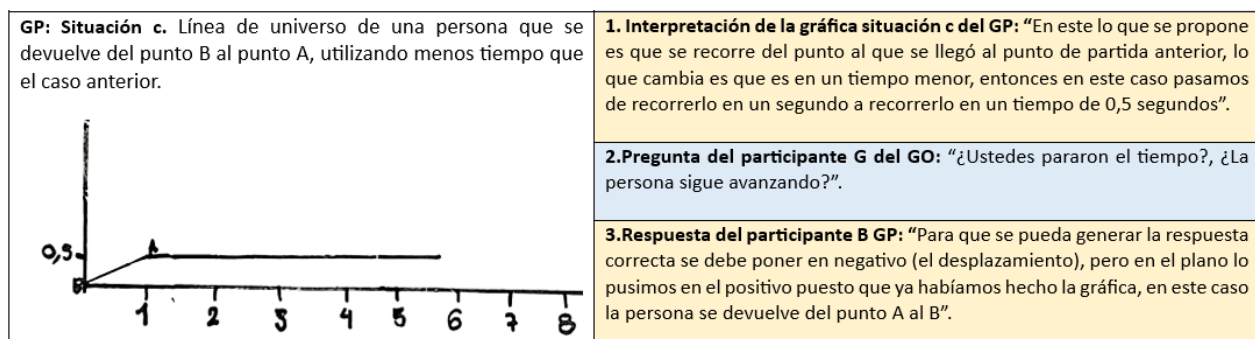
Ilustración 34. Representación de la situación “b” dada por el grupo GP en un diagrama de espacio-tiempo.

Se observa en la representación del grupo GP, que persiste la idea del transcurso del tiempo en relación al movimiento del objeto, en el cual, si la persona de la situación “b” se encuentra en estado de reposo en el punto B, el tiempo no transcurre, siendo representado por parte del grupo GP de forma paralela al eje espacial. Este aspecto puede indicar que no se están significando adecuadamente los ejes espacial y temporal desde un contexto relativista, en el cual un cuerpo, a pesar de estar en estado de reposo, presenta una línea de universo paralela al eje temporal (Indicando el transcurrir del tiempo independiente del sujeto en cuestión).

La representación de la situación “c” realizada por el grupo GP (véase Figura 35), es similar a la representación que presentan en el caso anterior. Para el presente diagrama de espacio-tiempo mencionan: “[para este caso] lo que se propone es que se recorre del punto al que se llegó al punto de partida anterior, lo que cambia es que es en un tiempo menor, entonces en este caso pasamos de recorrerlo en un segundo a recorrerlo en un tiempo de 0,5 segundos” (CA-2, GP, s-c). Conforme al diagrama realizado, se evidencia que aún se persiste en la idea de ubicar un cambio inicial de movimiento en el origen de coordenadas, adicionalmente, se asocia a la posición final con un estado de reposo, en donde el tiempo se detiene. El participante PG del grupo GO pregunta al grupo GP: “¿Ustedes pararon el tiempo?, ¿la persona sigue avanzando?” (CA-2, GO, PG, s-c). A lo que el participante PB del grupo GP responde: “Para que se pueda generar la respuesta correcta se debe poner en negativo (el desplazamiento), pero en el plano lo pusimos en el positivo puesto que ya habíamos hecho la gráfica, en este caso la persona se devuelve del punto A al B” (CA-2, GP, PB, s-c). El grupo GP atribuye el sentido del movimiento del cuerpo conforme al cuadrante empleado en el sistema de coordenadas describiendo de

forma completa su trayectoria (aunque no representado en la gráfica). No obstante, la representación no es adecuada, probablemente debido a que no se ha comprendido su semántica. De lo anterior, se observa que el debate promueve como lo afirma Chávez y Fuentes (2010), una producción cooperativa del conocimiento, en donde el intercambio simbólico y el consenso entre diferentes visiones del fenómeno estudiado, permitan una co-construcción de saberes, orientados a través de la capacidad de producir argumentos que promuevan el cambio de perspectivas, siendo cada vez más cercanas al conocimiento científico en el aula.

Ilustración 35. Representación de la situación "c" dada por el grupo GP en un diagrama de espacio-tiempo (al lado izquierdo) y la interpretación del diagrama (al lado derecho).



Conforme a los contraargumentos del grupo GO, se observa que lograron identificar en el grupo GP problemas en cuanto a la traducción del diagrama de espacio-tiempo y a la interpretación realizada, debido al hecho de suponer pasados los 0,5 segundos una invariabilidad en el eje temporal, aspecto que no corresponde con los diagramas de Minkowski, en donde el devenir del tiempo es constante. Adicionalmente, se evidencia que ante las preguntas formuladas por el grupo GO, el grupo GP estuvo obligado a la búsqueda de razones y evidencias para respaldar su argumento inicial; lo que promovió una movilización de pensamiento, en el cual como lo afirma Lipman (1995, citado por Boisvert, 2004, p.39) el razonamiento de la situación (planteada en este caso por el grupo GO), permita al grupo GP el encuentro de aspectos suplementarios que se puedan añadir atendiendo a la búsqueda de criterios que fundamenten los juicios de valor desarrollados inicialmente.

Por último, en la representación realizada por parte del grupo GP a la situación “f” (Véase Figura 36.a), en donde se afirma que: “[Para representar la línea de universo] de una persona que se está moviendo a gran velocidad, [se representaría] entonces como mayor distancia que tiempo” (CA-2, GP, s-f). Se evidencia que la representación de la situación física por parte del grupo GP es la esperada teóricamente conforme a la línea de universo de una persona que se mueve con velocidad uniforme. Sin embargo, el participante PK en defensa de la representación realizada por el grupo GO argumenta: “Una persona en reposo, ve a otra persona moviéndose rápidamente, entonces, en 8 segundos no se movió nada, por ende, está en reposo, luego este empieza moviéndose despacio, porque recorre 1 metro en 6 segundos (va despacio), pero de ahí coge y aumenta, porque ya se mueve otros tres metros en un segundo, y ya de ahí se mueve otro metro, en otros cuatro segundos [...]” (CA-2, GO, PK s-f).

De acuerdo a la interpretación realizada por el participante PK del grupo GO, se evidencia el empleo de mediciones imaginarias para la explicación del fenómeno físico, el cual es un recurso que apela a criterios físicos, debido a que estos presentan un soporte real y verificable; adicionalmente, las expresiones que atribuyen al uso de personas o elementos involucrados en la situación física, además de la aplicación intencionada de mediciones estimativas (para cantidades físicas como tiempo y distancia) son indicio del uso de la experimentación mental, en donde Kuhn (1982) afirma que para la construcción de un experimento imaginario es menester que este esté relacionando con experimentos que fueron contruidos en el mundo real debido a una cuestión de verosimilitud, en donde se apliquen conceptos y hechos empíricos previamente aprendidos.

Por otro lado, el participante PA del grupo GP contraargumenta: “No nos queda claro qué personaje es cada uno, bajo la interpretación que nosotros tenemos como espectadores, el personaje que está expectante debe tener una línea constante sin interrupción, es decir, no puede pasar de observar de

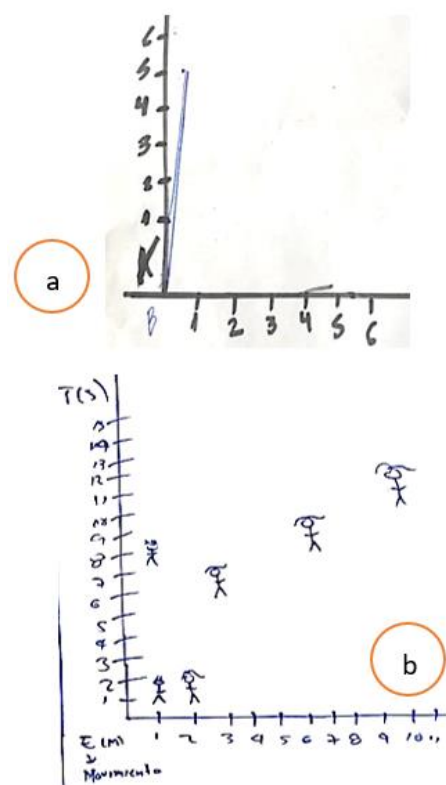


Ilustración 36. Representación de la situación “f” dada por el grupo GP (ilustración a), y representación dada por el grupo GO, (ilustración b) en un diagrama de espacio-tiempo.

segundo uno a observar al segundo 8, o sea, hay 6 segundos de pérdida visual” (CA-2, GP, PA s-f). De acuerdo a la interpretación realizada por el participante PA del grupo GP, se identificaron incongruencias de traducción, (es decir, en el proceso de construcción de la gráfica a la interpretación de la misma). Puntualmente, las incongruencias residen en el concepto de línea de universo, en dónde, al no explicitarse en el diagrama construido por el grupo GO, conduce a errores conceptuales de interpretación, en la medida que, al no trazarse la línea de universo del cuerpo, hay un intervalo de tiempo en el que este no percibe el movimiento del otro observador. Adicionalmente, se observa que el participante PA contraargumenta de forma cuantitativa el hecho de que no se explicita la línea de universo en la representación dada por el grupo GO. En este sentido, Lipman (2003) amonesta a que los argumentos sean bien fundamentados, presentando responsabilidad cognitiva de lo que se desea comunicar, lo que permite una capacidad mayoritaria de aceptación y fomentando a su vez el desarrollo del pensamiento crítico, que en el contexto de la presente actividad, refiere no solo a que los grupos de debate presenten una adecuada traducción de la situación física planteada en el diagrama de espacio-tiempo de la forma teóricamente esperada como en el caso (CA-2, GO, s-b) y (CA-2, GP, s-f), sino también se haga una interpretación responsable declarando argumentos que estén fundamentados en criterios, que en este caso estuvieron presentes en el uso de mediciones estimativas como forma de validación de los argumentos puestos en debate.

La segunda actividad en modalidad de debate crítico (MDC) en el grupo de discusión (GD-2), tenía el propósito de que los participantes, no sólo desarrollaran experimentos mentales dentro de los grupos de discusión, empleando como recurso los experimentos mentales de experiencia personal contruidos previamente, sino también la exploración en conjunto de diferentes perspectivas de experimentación mental, la formulación de preguntas y la participación en discusiones colaborativas para la construcción de nociones de espacio-tiempo relativista; además de promover el desarrollo de habilidades críticas en la clase de física. Para tales propósitos, el debate crítico giró en torno a la segunda situación hipotética desarrollada en la actividad anterior (véase Figura 35), en donde se distribuyeron los participantes en dos grupos característicos: grupo proponente (GP) y grupo oponente (GO); los cuales defendieron un caso planteado derivado de la situación hipotética, en donde se da apertura al debate y a la revisión de perspectivas en cada uno de los grupos. El grupo GP asumía el rol de defender en qué condiciones puede ganar la apuesta el astronauta, por el contrario, el grupo GO en qué condiciones podía ganar el viajero espacial. En cada grupo de discusión se designó un representante, cuya función principal fue expresar los

argumentos consensuados por los miembros de su grupo. Este representante actuó como portavoz, asegurando que las ideas y posturas del grupo fueran presentadas de manera clara y organizada durante las discusiones. Adicionalmente, Los participantes pueden argumentar libremente durante el debate, en donde se dejó constancia de su participación en las unidades de análisis y su codificación correspondiente.

Ilustración 37. Situación hipotética puesta en consideración para el debate crítico.

Situación hipotética

Un astronauta y un viajero espacial se encuentran en el espacio exterior, con la preocupación de que sólo queda un tanque de oxígeno para volver a la tierra, por lo cual hacen una apuesta de vida o muerte, cada uno con la seguridad de ganar la apuesta. Consiste en que el primero que impacte un rayo de luz a una lámina de metal dispuesta verticalmente a miles de kilómetros de distancia podrá disponer del tanque de oxígeno. Ambos iniciarán en el mismo punto y un observador les dará la orden de salida. Sin embargo, en el inicio de la carrera, el astronauta se encontrará en reposo y únicamente podrá emitir el rayo de luz, mientras que el viajero espacial dispondrá de la nave y en el mismo instante en que emita el rayo, encenderá la nave en búsqueda de la lámina. Habrá un segundo observador que estará ubicado al lado de la lámina para saber que rayo impactó primero, vale aclarar que el rayo de cada uno es de diferente color, por lo cual se sabrá el ganador con certeza.

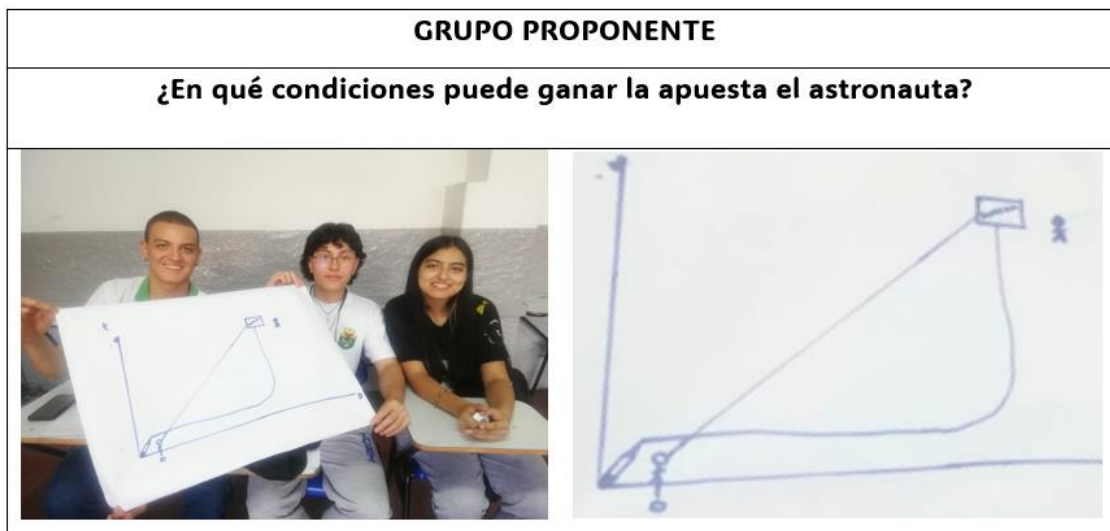
Previo al debate crítico, cada grupo debía plasmar sus argumentos de forma escrita, con el propósito de que se entregaran sus puntos de vista al grupo contrario durante la etapa de revisión de perspectivas, esto con el objetivo de que cada grupo se acercara con mayor claridad a los argumentos de su contraparte. Adicionalmente, debían exponer su representación de la opción favorable a la situación propuesta, a través de un diagrama de espacio-tiempo.

Durante la etapa de presentación de argumentos se muestra la representación realizada por el grupo GP (véase Figura 38), afirmando: “[...] como podemos ver, el astronauta que está quieto será el primero que llegue a la lámina, enfocándonos en que, en el mundo inercial, el movimiento que tiene la nave puede afectar el movimiento que tiene el láser. ¿A qué nos referimos con esto? la velocidad y el movimiento que tiene la nave no tenemos claro si va a ser constante, puesto que si no se tiene un momentum claro puede tener distintas variabilidades” (GD-2, GP, p.a-1) Ante los argumentos y el diagrama de espacio-tiempo realizado por el grupo GP, se observa que en su narrativa se hace un ejercicio del pensamiento mostrando un escenario favorable para el astronauta; según su perspectiva, el movimiento variable de la nave conduce al desvío del haz de luz en el espacio-tiempo, a causa de esto, el astronauta hace incidir el rayo de luz en la lámina antes que el viajero.

Este ejercicio del pensamiento que se observa en la unidad de análisis es derivado, tal como afirma Mach (1948), a partir de aspectos conservados por el recuerdo y el lenguaje, permitiendo recrear una experiencia mental que proporcione una explicación que se ajuste a la situación hipotética planteada; de hecho, el asumir que la velocidad de la fuente influye en la velocidad del rayo de luz es un concepto propiamente de la física clásica, previamente aprendido, que influye en la comprensión de la situación planteada por parte del grupo GP.

Asimismo, el grupo GP afirma “planteamos la situación [del viajero espacial] de que viene en un constante movimiento en un tiempo, y luego se ralentiza la distancia y aumenta la velocidad [...] podemos ver que el tiempo en el que llega [el haz de luz] es un poco más avanzado [...] en que nos estamos centrando nosotros principalmente es en la conservación del movimiento y en el movimiento inercial” (GD-2, GP, p.a-2). Se evidencia que en los argumentos del grupo GP se explicitan una serie de juicios basados en criterios previos, en donde, como afirma Lipman (2003), los juicios son producto de reglas o principios propios de cada disciplina, que permiten una interpretación responsable de los hechos, que para los propósitos de la interpretación del grupo GO, corresponden a la inercia y la conservación del movimiento los cuales fundamentan su experiencia mental.

Ilustración 38. Representación en un diagrama de espacio-tiempo de la situación favorable en donde el astronauta ganaría la apuesta.

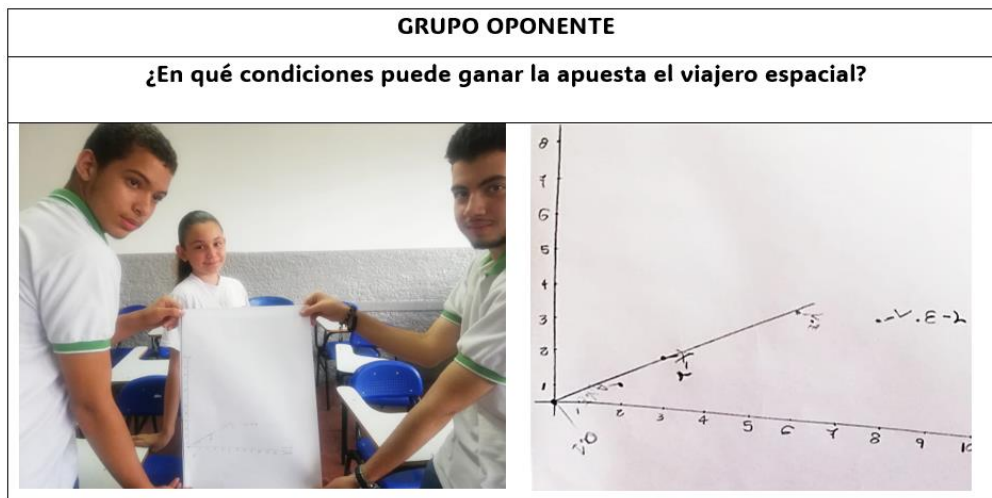


Posteriormente, se muestra la representación realizada por el grupo GO (véase Figura 39), afirmando: “Planteamos la situación en la que el láser del viajero espacial llegara antes que el del astronauta, nos basamos en que primero los dos empiezan desde un punto cero, siendo que, aquí al lado de ellos está el observador y acá ellos” (GD-2, GO, p.a-1). Se evidencia que en la descripción del experimento mental se realiza una identificación de las personas involucradas, relacionándolos con una ubicación espacial y haciendo uso del concepto de observador.

El grupo GO continúa diciendo: “Y el astronauta desde esta misma distancia es que desprenderá la luz de su laser, pero el viajero especial, seguirá en su nave mientras tiene el láser prendido, por lo que este llegará antes, siendo que esta es la distancia de la luz en el momento en que el astronauta lo lleva, pero en ese tiempo que va la luz el viajero espacial ya con su nave ha alcanzado más distancia, por lo que gracias a esa distancia y que el láser sigue prendido llegará antes” (GD-2, GO, p.a-2).

Por lo anterior, se observa que las declaraciones realizadas por parte del grupo GO presentan una consecuencia lógica (que el rayo de luz del viajero llegue primero a la lámina) partiendo deductivamente de premisas generales (el rayo de luz del viajero cubre una mayor distancia por el movimiento de la nave), a esto se le denomina como argumentos de reducción, en donde, como lo afirma Norton (1991), permita la eliminación de detalles irrelevantes propios de la experimentación mental que deriven a resultados concluyentes a través de una relación de causalidad, en dónde uno o más eventos sean consecuencia de otros. Tales argumentos se basan en premisas de la suma de velocidades desde la perspectiva de la física clásica, hecho que conduce a la afirmación de que el rayo de luz emitido por viajero es el que llegaría primero. Por último, se evidencia que el argumento desarrollado por parte del grupo GO, se basa en un conjunto de afirmaciones soportadas lógicamente que respaldan su punto de vista dentro de una actividad cognitivo-discursiva (Leitao, 2012).

Ilustración 39. Representación en un diagrama de espacio-tiempo de la situación favorable en donde el viajero espacial ganaría la apuesta.



Ante la pregunta del moderador al grupo GP de si ¿se han suscitado preguntas de acuerdo con los argumentos propuestos por el grupo GO para la victoria del viajero espacial?, el participante PA del grupo GP responde: “La única [...] duda es en qué nos estamos enfocando si en la inercial o la no inercial, sobre todo en el movimiento de la nave y de la luz [...], la inercialidad podemos ver que se altera la fuerza de cuerpos externos, por decir, la velocidad cuando se acerca a la velocidad de la luz, se tiene la deformación o el estiramiento de cuerpos; y la no inercial, podemos ver que se conserva sin importar que se supere la velocidad de la luz, la masa pues tal cual como es” (GD-2, GP, p.c-1). Se observa que el grupo GP formula una pregunta que se apoya en criterios, con el propósito de que el grupo GO pueda fundamentar teóricamente la situación favorable para el astronauta. De ahí que se perciban habilidades de búsqueda por parte del grupo GP, en donde, como lo afirma Boisvert (2004), corresponde a una práctica autocorrectiva donde se juzgan los medios convenientes para estudiar un problema, asociando en este caso el concepto de inercialidad en el movimiento de los observadores. A pesar de esto, se evidencia que se presentan confusiones en la diferenciación de un sistema de referencia inercial y no inercial por parte del grupo GP: mientras que en el primero los cuerpos no experimentan fuerzas o aceleraciones, el segundo está sujeto a algún tipo de aceleración debida a la deformación del espacio-tiempo, aspecto clave de la relatividad general.

Inmediatamente el participante PB del grupo GP pregunta: “El cohete prendía el láser primero, lo que hacía que este ganara, el problema acá es que es una competencia para salvar una de las vidas de las personas, por lo que al prender un láser primero se consideraría como trampa y no se podría llevar a cabo como una competencia justa. ¿Cuál es su argumento a favor de que este sea el ganador?” (GD-2, GP, p.c-

2). Ante la pregunta del participante PB se evidencia que sus argumentos presentan un “buen juicio”, en donde, como afirma Lipman (2003), es un pensamiento aplicado con la finalidad de presentar un producto derivado de una interpretación responsable, que para el presente caso concierne que la situación hipotética planteada sea justa para ambos observadores, teniendo sentido conforme a las reglas o criterios establecidos. Adicionalmente, se observa que para el grupo GP, la carga de la prueba que proporciona el grupo GO en respuesta a su experimento mental es ineficiente; de hecho, autores como Rips (1998) afirman al respecto que el diseño de un experimento mental como argumento debe estar respaldado por la carga de la prueba que un participante pone en debate, es decir, a la responsabilidad de presentar pruebas convincentes para respaldar una afirmación.

En respuesta a las preguntas formuladas por el grupo GP, el grupo GO responde: “Lo que nosotros queremos decir en ese caso es que el astronauta fue el que demoró en prender, por lo que el viajero espacial lo prendió al tiempo justo, pero el astronauta se demoró más, por lo que el viajero llega antes que el del astronauta, siendo el de la culpa el viajero y no el astronauta” (GD-2, GO, r.g-1). Se evidencia que el grupo GO imagina que la causa de la victoria del viajero es que este haya emitido el rayo primero que el astronauta, aspecto que rompe con la lógica establecida inicialmente en el problema. Ante la respuesta brindada por el grupo GO, el grupo GP afirma: “por más de que haya sido la variabilidad que ustedes hayan puesto en su experimento mental [...] nos pone [en la situación hipotética] que es justamente al mismo tiempo, entonces lo que a nosotros nos causa la duda, es cómo sucedería ese inicio adelantado” (GD-2, GP, c.c-1). Ante la respuesta del grupo GP se evidencia una falta de convencimiento por la carga de prueba dada por el grupo GO, esto debido a que los argumentos no se ajustan con las reglas establecidas en el problema lo que genera dudas en su validez. En efecto, Rips (1998) menciona en este aspecto que la carga de la prueba establece al ganador de los argumentos puestos en debate, en cuyo caso, si un participante lanza afirmaciones desmedidas esto aumentará proporcionalmente la carga de la prueba, las cuales deberán ser proporcionales a las afirmaciones presentadas en discusión.

Ante la pregunta del moderador al grupo GO de si ¿se han suscitado preguntas de acuerdo con los argumentos propuestos por el grupo GP para la victoria del astronauta?, el participante PG del grupo GO responde: “Les quería preguntar al otro equipo [sobre cómo el] movimiento del cohete en el espacio altera el resultado final [...] cómo está alterando esto, [...] de que este laser cambie de posición o siga la trayectoria inicial” (GD-2, GO, p.c-1). En respuesta, el participante PA del grupo GP afirma: “Al momento

en el que el cohete no sigue un movimiento rectilíneo uniforme, va a generar un movimiento por más mínimo que sea [...] un transcurso más largo en el recorrido del láser, puede que para quién vaya dentro de la nave el movimiento no haya sido perceptible o que realmente siga su recorrido inicial; qué sucede con esto, por más de que sea un movimiento de un metro o muy mínimo, al momento en el recorrido se va a aumentar la distancia, lo que va a afectar el resultado final del observador que está pendiente a la obtención de los rayos” (GD-2, GP, PA r.g-1). Se observa que en el experimento mental realizado por el grupo GP se atribuye la victoria del astronauta, a causa del retraso del láser del viajero espacial por el cambio de trayectoria en el movimiento de la nave, esta afirmación apoyada por situaciones imaginarias, muestra un escenario en el cual la nave no presenta un movimiento rectilíneo hacia la lámina, desviándose de esta. Puede considerarse que estas interpretaciones expresadas están en correspondencia con lo afirmado por Mach (1948) en relación a una predicción de resultados mediante la aplicación de experimentos mentales, en dónde el ejercicio del pensamiento permite realizar conjeturas de posibles conclusiones que escapan del alcance de lo previamente establecido por la situación hipotética dada.

Posteriormente, se presenta una pregunta adicional formulada por el participante PG del grupo GO acerca de: ¿cómo afecta la relatividad de la onda al movimiento no rectilíneo del láser de un astronauta, en comparación con el cohete en términos de velocidad? a lo que el grupo GP argumenta: “Al momento en que se altera la distancia que está recorriendo el objeto [...] si el cohete tiene un movimiento no recto, sino en una forma de semicírculo, la distancia que puede recorrer va a ser mayor, en teoría, a la que debería recorrer en el movimiento en recta También debemos tener en cuenta que puede haber variabilidades en el lugar en el que estemos, nos estamos enfocando en el vacío en el que va la línea completamente recta sin obstrucciones” (GD-2, GP, r.g-2) (Véase Figura 40). Se observa que, para el grupo GP se persiste en la idea de que el movimiento de la nave describiendo una trayectoria no rectilínea, retarda la incidencia del láser sobre la

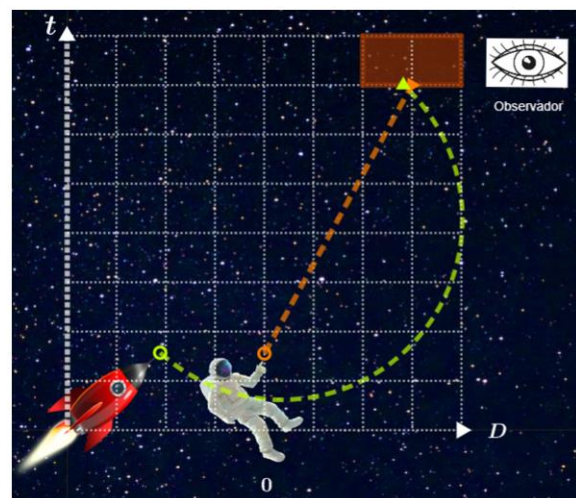


Ilustración 40. Representación en Geogebra de la situación imaginaria dada por el G.P que sustenta la victoria del astronauta.

Fuente: (Stickpng.com, n.d.),
(Dibujalia.com,n.d.), (Lovepik.com, n.d.).

lámina; se infiere que para el grupo este movimiento de la nave es natural, por ende, le es imposible a la nave mantener una trayectoria recta en el espacio-tiempo. Adicionalmente se evidencia que, mediante un ejercicio de reflexión y el empleo de experiencias imaginarias acerca del fenómeno, el grupo GP presenta una conclusión factible de la situación física planteada; sin embargo, el resultado dado por el grupo GP difiere del resultado esperado teóricamente, en cuyo caso ambos rayos inciden al mismo tiempo a la lámina en el contexto de la TER. En efecto, estos espacios de debate, como afirman Romero, Henao & Barros (2013) que propician la argumentación, el encuentro de opiniones, creencias y supuestos, incentivan el pensamiento crítico y reflexivo cultivando diferentes formas de ver el mundo en la clase de ciencias. Asimismo, autores como Leitao (2012) afirman que la argumentación para el desarrollo de habilidades críticas, tiene lugar en la medida en que un grupo de individuos exponen sus puntos de vista, formulando razones que las respalden y a la valoración de perspectivas contrarias.

A nivel general, en los argumentos dados tanto por el grupo GP como por el grupo GO, se evidencian una serie de aspectos a destacar: (1) *Los diferentes tipos de argumentos*, en donde algunos de estos presentaban las condiciones necesarias para ser considerados como experimentos mentales, a pesar de que en la realización de las actividades preliminares los participantes no tenían conocimiento de la elaboración de un experimento mental; se evidencia que tal construcción es una actividad constitutiva del ser humano, y que es aprendida naturalmente en su afán de dar explicación a elementos abstractos del lenguaje o elementos puramente matemáticos, en este caso en el ámbito físico. (2) *La explicación del funcionamiento de la experiencia imaginaria a través de la afirmación y defensa de ideas propias y su representación en el diagrama de espacio-tiempo*, en donde no solo se identifican ciertas variables implicadas en el movimiento del cuerpo (por ejemplo, distancia y tiempo de recorrido), sino que también se pone en evidencia la construcción de inferencias lógicas en defensa de las representaciones espacio temporales, donde se emplearon nociones y conceptos-aprendidos en clase de física y (3) *la presentación de algunos puntos de vista presentados en los grupos de discusión y la revisión de perspectivas en torno a los diagramas espacio temporales*, en donde las habilidades de traducción propias del pensamiento crítico jugaron un papel importante en las interpretaciones expuestas en debate y cómo éstas se ajustaban a las representaciones que daban cuenta de las situaciones físicas puestas en consideración. Además de la revisión de perspectivas del equipo contrario, en donde, se observa que a través de la formulación de preguntas permitió reconocer de forma más amplia los puntos de vista de cada grupo. Finalmente, nos apoyamos en las afirmaciones de Leitao (2012), quien afirma que el intercambio de ideas y la defensa de

éstas permiten el desarrollo de habilidades críticas en los estudiantes, aduciendo que pensar críticamente es consecuencia de las prácticas argumentativas realizadas en la clase de física.

6.2.2 Experiencias imaginarias como mecanismo para un conocimiento autorregulado y reflexivo.

A través de esta subcategoría se aborda cómo la experimentación mental entendida como argumento (Norton, 1991) promueve un pensamiento autorregulado, de acuerdo con Leitaó (2012), se basa en la reflexión por parte del individuo acerca de los límites (debilidades) de sus propios argumentos, encaminado a la regulación de los procesos de pensamiento de carácter individual y su aprendizaje durante este proceso. Los indicios asociados a esta subcategoría incluyen Identificación de argumentos de calidad y su incorporación al pensamiento, además de la identificación de límites de sus concepciones o perspectivas. Estos aspectos fueron registrados a través de la modalidad de cuestionario abierto (CA), además de grabaciones de audio y su transcripción correspondiente para registrar con precisión lo que se dijo en cada grupo de discusión (GD), poniendo en consideración las representaciones visuales realizadas por los participantes a través de diagramas de espacio-tiempo relativista y cómo estos son un medio para explicar y representar no solo las narrativas orales y escritas, sino también las experiencias imaginarias elaboradas por los participantes de la investigación.

Para la actividad se distribuyeron los participantes en dos grupos característicos: grupo proponente (GP) y grupo oponente (GO); los cuales defendieron un caso planteado derivado de la situación hipotética, en donde se analizan los límites de validez de cada uno de los argumentos puestos en debate y cómo los argumentos pueden ser aceptados o por el contrario rechazados conforme a la carga de la prueba presentada. El grupo GP asumía el rol de defender en qué condiciones puede ganar la apuesta el astronauta, por el contrario, el grupo GO en qué condiciones podía ganar el viajero espacial.

Ante la pregunta del moderador al grupo GP de si continúan con su posición (que el astronauta gane la apuesta) o adoptar la posición del equipo contrario, el grupo afirma: “Nosotros tomamos la iniciativa de que el grupo de ellos tiene como así decirlo, una cierta razón, aunque los argumentos no fueron del todo acertados, la explicación del ejercicio nos dice que generalmente en el vacío siempre va a ver la misma velocidad en la luz, o sea, eso nunca va a cambiar. Y si el astronauta se acerca más a la lámina refractora, obviamente le va a llegar más rápido la refracción de la luz. Pero esto también desencadena

diversos puntos como lo podrían ser los diversos marcos de referencia que los dos personajes los podrían tomar, pero en general nosotros vemos que el punto va para el viajero espacial” (GD-2, GP, r.g-3). Se evidencia que el grupo GP se apoya en criterios afirmando que la velocidad de la luz es la misma en el vacío, y concluyendo que, si se emite el rayo de luz estando más cerca de la lámina, este llegaría primero. Por otra parte, en el proceso de revisión de perspectivas del equipo contrario, se observa falta de convencimiento hacia la postura del grupo GO (que el viajero gane la apuesta), debido a que sus argumentos no fueron convincentes; en efecto, Lipman (2003) afirma que los criterios como las reglas de juego o principios de una disciplina que permiten la elaboración de juicios bien fundamentados, generan credibilidad y objetividad en las opiniones que se exponen, en este caso en debate, en donde el pensamiento crítico y los criterios (relacionados con el buen juicio) se relacionan recíprocamente construyendo como fin último argumentos bien fundamentados o de calidad.

Ante la pregunta del moderador al grupo GO de si continúan con su posición (que el viajero espacial gane la apuesta) o adoptar la posición del equipo contrario, el grupo afirma: “Nosotros, seguimos con nuestra posición, ya que tendríamos una posibilidad del 50-50, que uno ganara por esta razón, y el otro ganara por la otra, [ya sea] por el acercamiento y distancia, o también varía [...] el tiempo como dijeron en el otro equipo, o que en el espacio la velocidad es la misma [...] o que el otro se le desviara el láser, entre otras posibilidades” (GD-2, GO, r.g-2). Se observa que el grupo GO asume que existen muchos factores que pueden influir en quien pueda ganar la apuesta, adoptando una posición neutral. Esto permite afirmar que no hay un firme convencimiento de que el viajero gane la apuesta; de hecho, su discurso adopta argumentos propios del equipo contrario que lo hacen dudar de su postura inicial; asimismo se percibe una transformación del discurso por parte del grupo GO que permite afirmar que el grupo valida los argumentos del grupo GP; en efecto, Leitaó (2012) afirma que la reflexión en cuanto a los límites de validez de los argumentos es un proceso propio de un pensamiento autorregulado, en el cual, se busca una comprensión precisa y una visión integral del fenómeno estudiado. En donde mediante el intercambio de ideas en debate se reúnen diferentes saberes que no son adquiridos a través de una apropiación individual, sino a partir de la interacción y el diálogo con otros. Proceso que enriquece el conocimiento a nivel personal al integrarse con perspectivas y experiencias compartidas.

Debido a las múltiples variabilidades que tuvieron en cuenta tanto el grupo GO como el grupo GP para tomar la decisión de quién era el ganador de la apuesta, complicándose la resolución del mismo, el

moderador formula la siguiente pregunta con la intención de resolver el problema: “Suponiendo que a lo largo del trayecto de la luz no hay ningún obstáculo, y que ambos rayos viajan libremente hacia la lámina, en este caso, para el grupo GP y el grupo GO. ¿Cuál sería el ganador?”. En respuesta a la pregunta, el grupo GP argumenta: “Para nosotros sería un empate. Con el empate podemos ver que no hay variabilidad tanto en la refracción ni en ningún objeto o alguna fuerza que restrinja como el movimiento de la luz y junto a esto pues el movimiento de la nave, entonces consideramos que se conserva todo, generando igual la distancia y la velocidad de las luces que impactan al mismo tiempo” (GD-2, GP, r.g-4). Por otro lado, el grupo GO afirma: “Lo que decían de la relatividad: La velocidad de la luz siempre tendrá la misma velocidad, entonces si no hay obstáculo alguno, sí o sí llegarán al mismo tiempo” (GD-2, GO, r.g-3). Se evidencia que tanto el grupo GP como el grupo GO llegan a la misma respuesta, la cual es la teóricamente esperada. Se observa que, mientras el grupo GO apela a eliminar los detalles irrelevantes (teniendo en cuenta las variabilidades en el movimiento de la nave espacial) para su experimento mental, el grupo GO apela al segundo principio de la relatividad especial de la velocidad de la luz en el vacío, en donde es igual para ambos observadores e independiente del movimiento de la fuente.

Tomando en consideración las respuestas del participante PA a la segunda guía de experimentación mental (G.E.M-2), el cual hace parte del grupo GP. Se observa que las respuestas que proporciona a nivel personal persisten en los argumentos en debate a nivel grupal en cuyo caso el grupo toma partido por el astronauta. En donde, en ambas actividades se hace alusión a la “lámina refractora” (CA-3, PA, G.E.M-2.1) y (GD-2, GP, r.g-3) como objeto a ser tenido en cuenta para la solución del problema, además de avocar términos como la “inercia” (CA-3, PA, G.E.M-2.5) y (GD-2, GP, p.c-1). Donde se intuye que refiere a los marcos de referencia tanto del astronauta como del viajero, que en términos de la situación hipotética serían equivalentes, debido a que son tratados como velocidades ordinarias. De acuerdo a lo anterior, se evidencia que, en el encuentro de ideas, el pensamiento individual puede permear las decisiones a nivel grupal, transformándose de una perspectiva personal hacia un conocimiento colectivo. Este proceso se genera cuando las ideas individuales son discutidas en debate lo que permite un consenso de ideas que eventualmente son incorporadas al pensamiento.

De acuerdo a lo anterior, se evidencia que a través del encuentro de argumentos se promueve la generación de conocimiento; esto, como lo afirma Leitao (2012), permite la elaboración de discursos que son a su vez construcciones del diálogo entre individuos, promoviendo así una construcción del

conocimiento a través de un encuentro permanente de ideas en sociedad. En general, la clase de física debe convertirse en un espacio de reflexión, cuyo centro de atención sea la razonabilidad, entendida como una disposición al cambio, aceptando de forma crítica los argumentos en debate mediante negociaciones y experiencias discursivas que permitan una apropiación dinámica de principios, leyes y teorías buscando comprender una disciplina científica desde una perspectiva crítica y constructiva a través del encuentro con el otro (Toulmin, 1977).

7 Conclusiones y Consideraciones finales

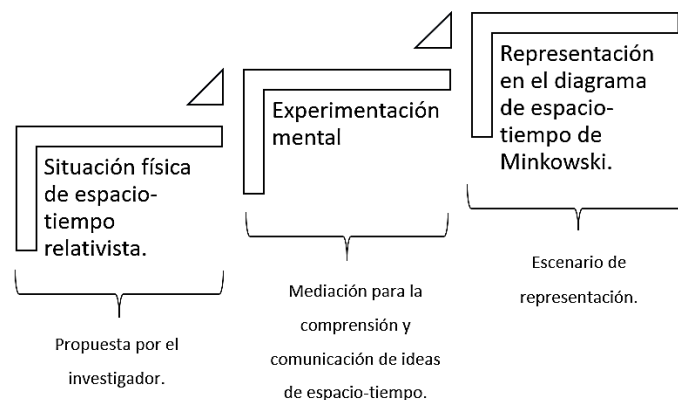
La presente investigación abordó la integración de la experimentación mental para el desarrollo de habilidades críticas y la construcción de nociones de espacio-tiempo relativista en estudiantes de nivel medio en Colombia. A partir de los objetivos propuestos y de los hallazgos obtenidos conforme a las categorías de análisis, se presentan las siguientes reflexiones:

En primer lugar, se constató que la experimentación mental es una actividad constitutiva del ser humano, la cual es aprendida naturalmente, ya sea para la comprensión de conceptos complejos o para su comunicación de forma efectiva. Esta capacidad de imaginar y crear experimentos mentales, dinamizada a través de la propuesta de enseñanza diseñada permitió comprender ideas abstractas, anticipar posibles resultados e interpretar situaciones físicas de corte relativista que se escapan de la realidad conocida. Se concluye que es habitual experimentar con los pensamientos, siendo construcciones provenientes de la experiencia con el mundo natural, en donde es común el uso de elementos narrativos que avocan aspectos irrelevantes para el fenómeno estudiado, pero que son un andamiaje para la comprensión y comunicación del mismo. A nivel discursivo en cada uno de los debates realizados (CA-2, GD-1) y (GD-2), se observa que los estudiantes construían experiencias mentales de forma natural para comunicar desde un lenguaje cotidiano (comprensible para el público) las situaciones físicas propuestas de espacio-tiempo a través del uso de mediciones estimativas y la recreación de un escenario imaginativo en donde la situación física planteada sea posible en la realidad conocida por los estudiantes como en los casos (CA-2, GO, PH, s-b), (CA-2, GO, PK, s-e), (GD-2, GP, PA r.g-1) y (GD-2, GP, r.g-2). De lo anterior se concluye que la experimentación mental es un instrumento a nivel cognoscitivo por el cual el individuo comprende aspectos abstractos (proveniente de las ideas) mediante su relación con experiencias previas del mundo natural (puramente observable). De ahí que el uso de mediciones estimativas (cálculos basados en escenarios hipotéticos) y expresiones cualitativas del movimiento (de cómo interpretan la situación física conforme a su visión del mundo) son clave en la construcción del conocimiento científico en la clase de física.

Para los propósitos del informe de investigación, el diagrama de espacio-tiempo de Minkowski fue el escenario por el cual los estudiantes representaban cada uno de los eventos, líneas de universo, objetos y personas involucradas en las situaciones físicas propuestas o en los experimentos mentales realizados

por los participantes. Además de tener en cuenta los argumentos en torno a estas representaciones, lo cual podía dar a entender el nivel de comprensión y el dominio de estos conceptos relativistas, los cuales fueron motivo de análisis alrededor de la construcción de nociones de espacio-tiempo. Se observó que en el cuestionario (CA-2) la mayor parte de los estudiantes trazaban correctamente los eventos y líneas de universo que correspondían a las situaciones físicas planteadas como en los casos (CA-2, GO, s-a), (CA-2, GO, s-b) y (CA-2, GP, s-d), a pesar de que en algunas situaciones recreaban la situación real sin una interpretación espacio temporal del fenómeno físico como en el caso (CA-2, GO, PK, s-e), por otra parte, en la mayor parte de las representaciones realizadas en el diagrama de espacio-tiempo se plasman los objetos o personas imaginativas que previamente eran parte de las narrativas de los participantes. De lo anterior se concluye que los diagramas de espacio-tiempo fueron una herramienta por la cual los participantes plasmaban sus experimentos pensados, por lo que la experimentación mental presentó dos vías de acción: Primero, permitió a los participantes comunicar sus ideas, traduciendo conceptos abstractos a un lenguaje comprensible y accesible; y segundo, permitió la representación de estos conceptos en diagramas de espacio-tiempo, promoviendo una comprensión visual del fenómeno físico de corte relativista en cada una de las situaciones propuestas. Adicionalmente, la primera actividad preliminar (CA-1) contribuyó a que los estudiantes presentaran resultados teóricamente esperados, debido a que los participantes tuvieron un primer acercamiento con la disposición de los ejes de coordenadas, esto se evidencia en el caso (CA-2, GP, s-a), en donde, a pesar de que el grupo GP dispuso de forma incorrecta los ejes de coordenadas, dieron cuenta de su error durante el debate por lo aprendido previamente en el cuestionario (CA-1).

Ilustración 41. Orden conceptual que se observa en la mayor parte de las actividades realizadas por los participantes del informe de investigación.



Durante el cambio de sistema simbólico del plano narrativo o discursivo al representativo mediante la elaboración de diagramas de espacio-tiempo relativista, se observaron habilidades de traducción características del pensamiento crítico. Esto implica que los estudiantes mostraron la habilidad de representar de forma coherente y consistente aquello que declaraban en sus narrativas, esto se evidencia en los casos (CA-2, GO, s-a), (CA-2, GO, PH, s-b) y (CA-2, GP, s-d), en donde se demuestra una conexión lógica entre los argumentos dados en debate y las representaciones gráficas realizadas.

Con el propósito de orientar una propuesta de enseñanza que promueva el diseño de experimentos mentales en la clase de física, se desarrolló una guía de experimentación mental para la estructuración y sistematización de la información relevante de una situación física de espacio-tiempo, facilitando la reducción y la organización de la información, permitiendo la identificación de elementos clave como: objetos, instrumentos, observadores involucrados y eventos del problema, los cuales son importantes para llegar a la conclusión deseada. Adicionalmente, estas guías permitieron fortalecer la habilidad de organización de la información característica del pensamiento crítico, la cual proporcionó un escenario en el cual los participantes clasificaran y priorizaran información relevante de forma lógica y coherente, facilitando una comprensión clara y precisa del fenómeno físico. Si bien este tipo de investigación cualitativa no tiene como propósito hacer generalizaciones, los hallazgos discutidos en el caso estudiado permiten considerar la potencialidad de las actividades propuestas tanto en el desarrollo del pensamiento crítico, como la comprensión del concepto de espacio-tiempo relativista, hecho que implica un grado importante de transferibilidad a tales secuencias de enseñanza.

Por otro lado, la experimentación mental tratada como argumento, puede servir como andamiaje para el desarrollo de habilidades críticas, en tanto sean parte argumental de prácticas dialógico-dialécticas que permitan el encuentro con otras visiones de mundo, en donde el encuentro de ideas, creencias y opiniones permita la construcción de nuevos significados a través de la revisión de diferentes perspectivas que promuevan el consenso y el disenso entre pares. Se concluye que el diseño de un experimento mental como argumento debe estar respaldado por criterios, los cuales constituyen la carga de la prueba que un participante pone en debate, es decir, por argumentos de “buen juicio” que permitieron presentar pruebas convincentes para el respaldo o validez de un experimento mental, dando respuesta a una situación hipotética planteada con el fin de reconocer el intervalo de validez de cada uno de los argumentos puestos

en debate, generando procesos de autorregulación que promovieron la evaluación de ideas propias y perspectivas contrarias, además de su posterior incorporación al pensamiento.

Esta investigación posibilita abrir líneas de investigación en torno a la enseñanza de la física moderna a nivel medio, especialmente en el uso de representaciones geométricas que permitan articular el pensamiento común de los estudiantes y los desarrollos de las teorías físicas contemporáneas, que pueden ser motivo de discusión en el aula a través de la implementación de debates con connotación crítica, el cual se propicie un escenario para la construcción de argumentos con “racionalidad cognitiva” y la apertura para diseñar experimentos mentales con el fin común de acercar el conocimiento científico al lenguaje próximo de los estudiantes. Por otro lado, a modo de apuestas investigativas que se pueden generar a partir del presente informe de investigación, se amonesta a la aplicación de herramientas digitales que permitan la modelación de sistemas de referencia tanto en el contexto newtoniano como relativista, en donde los educandos puedan manipular variables y cantidades físicas, mientras se ponen en discusión las diferentes interpretaciones a través de la conformación de un modelo de debate crítico, en donde la experimentación mental surja como medio de comunicación y de transmisión de ideas.

Dentro de las limitantes que se suscitaron a lo largo de la investigación se rescatan la falta de tiempos extra clase para los encuentros de investigación, debido a los compromisos de los estudiantes con otras asignaturas, además del tiempo reducido que tanto estudiantes como docentes deben permanecer en la institución por fuera de la jornada académica. Esto generó que la etapa de implementación se extendiera y, por lo tanto, tener demoras en cuanto al análisis de la información recogida, especialmente en la triangulación de la información. Asimismo, en principio se evidenciaron inconvenientes conceptuales en algunos participantes al representar los experimentos mentales de experiencia personal en el diagrama espacio-tiempo. Este aspecto se subsanó de forma natural a lo largo de la investigación, en tanto se realizaron experimentos mentales de forma colectiva, generando debate acerca de las representaciones más cercanas a la situación hipotética de corte relativista, en donde dichas representaciones eran aceptadas o refutadas mediante el debate y el uso de argumentos.

Por último, en lo concerniente a mi formación como profesor investigador, el trabajo de investigación realizado fue una oportunidad para transformar mi práctica docente hacia una perspectiva holística de enseñanza, en donde el conocimiento científico abordado en el aula permita desarrollar

diferentes habilidades intelectuales en los estudiantes, fomentando un desarrollo integral que abarque aspectos como el desarrollo de un pensamiento crítico y reflexivo, la apertura de relaciones colaborativas en el aula de clase y un aprendizaje de las ciencias naturales que permita adquirir en los estudiantes diferentes visiones de mundo que transformen la forma en cómo se piensa y se vive la ciencia.

Referencias

- Arango, J., Henao, B. L. (2013). Hacia una formación científica en y para la civilidad: La argumentación en el contexto de discusiones sobre la explotación minera del oro como un asunto sociocientífico. En A. E. Romero Chacón, B. L. Henao Sierra, & J. F. Barros Martínez (Eds.), *La argumentación en la clase de ciencias: Aportes a una educación en ciencias en y para la civilidad fundamentada en reflexiones acerca de la naturaleza de las ciencias* (pp. 103–127). Universidad de Antioquia.
- Arriasecq, I., Greca., Cayul, E. (2017). Teaching-learning sequences based on research results: Proposal of a theoretical framework to addres Special Relativity Theory. *Ensenanza de Las Ciencias*, 35(1), 133–155. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.1716>
- Ascanio Maestre, D. V. (2021). *Formación en ciencias como estímulo al desarrollo de habilidades de pensamiento crítico: la teoría de la relatividad en lo cotidiano* [Trabajo de grado, Universidad de Antioquia]. Biblioteca digital de la Universidad de Antioquia. <https://bibliotecadigital.udea.edu.co/entities/publication/f06a2811-0f1e-468d-b50f-1140b2123090>
- Barrera, M., Suárez, I; Hernández, R. (2020). Agujeros negros: una propuesta para abordar algunos conceptos de física con estudiantes de educación media vocacional. *Revista Electrónica EDUCyT*, Vol. Extra, pp. 1035 -1047
- Bermejo Barrera, J. C. (2013). Historicidad y pseudo-historicidad del universo: un análisis del concepto de simultaneidad. *Historiografías: Revista de historia y teoría*, 5, 107-117. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4531484>
- Boisvert, J (2004). *La formación del pensamiento crítico. Teoría y práctica*, México, Fondo de Cultura Económica.
- Buendía, L., & Berrocal, E. (2001). La ética de la investigación educativa. *Agora digital*, 1, 9-22. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=963248>
- Camargo, L. (2021). Estrategias cualitativas de investigación en educación matemática. Recursos para la captura de información y el análisis. Editorial Universidad de Antioquia - Universidad Pedagógica Nacional.
- Castañeda Zapata, E. A., López Ríos, S. Y., & Osorio Vélez, J. A. (2024). *La relatividad general en la educación básica y media: una revisión sistemática*. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 21(2), 230301–230320. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2024.v21.i2.2303
- Chávez, P., & Fuentes, C. (2010). Nuevas ciudadanías en espacios emergentes de participación. *Praxis. Revista de Psicología*, 18(1), 65-89. Universidad Diego Portales.
- Cisterna, F. (2005). Categorización y triangulación como procesos de validación de conocimiento en investigación cualitativa. *Theoria*. 14(01). pp. 61 - 71.

-
- Cooper, R. (1999). From thought experiments to real experiments: Methodology in the philosophy of mind. *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 30(2), 263–271.
- Congreso de la República de Colombia. (1994). Ley 115 de Febrero 8 de 1994. In *Diario Oficial De La República De Colombia* [Legal]. https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-85906_archivo_pdf.pdf
- Dibujalia.com. (n.d.). Ojo con pestañas [Imagen]. Dibujalia.com. <https://dibujalia.com/photo/2535/ojo-con-pestanas>
- Einstein, A. (1917). On the electrodynamics of moving bodies. *Annalen der Physik*, 17(891), 891-921. <https://archive.org/details/einstein-1905-relativity>
- Einstein, A. (1912). Manuscript on the theory of relativity: A facsimile. George Braziller.
- Einstein, A. (1998). Sobre la teoría de la relatividad. *Annalen der Physik*, 17(891), 891-921. <https://archive.org/details/einstein-1905-relativity>
- Escribano, J. (2012). *Cosmología para secundaria*. Editorial: Antares Producción & Distribución, S.L. Bogotá, Colombia.
- Facione, P. A. (2007). Pensamiento Crítico: ¿Qué es y por qué es importante?. Recuperado de: <http://www.eduteka.org/PensamientoCriticoFacione.php>
- Facione, P. A. (2007). Infusing instruction in thinking into content instruction: What do we know about its success?. *Insight Assessment*. <https://www.insightassessment.com/infusion-thinking-content-instruction-success>
- Fonseca Hincapié, Y. L. (2019). *Desarrollo del pensamiento crítico y reflexivo a partir de la enseñanza de la física* [Trabajo de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio institucional de la Universidad Distrital. <https://repository.udistrital.edu.co/server/api/core/bitstreams/b921234d-ffb3-43fc-99b6-d651642a4bf1/content>
- Fundación Omar Dengo. (2014). Competencias del siglo XXI: Guía práctica para promover su aprendizaje y evaluación. Fundación Omar Dengo. <https://www.fod.ac.cr/competencias21/media/Competencias%20del%20siglo%20XXI%20-%20guia%20practica-parte3.pdf>
- Freire, P. (1970). *Pedagogía del oprimido*. Siglo XXI Editores.
- Galvis, L. (2019). Enseñanza de la teoría especial de la relatividad sobre los conceptos de espacio y tiempo para potenciar habilidades de pensamiento crítico en estudiantes de grado décimo de la institución Antonia Santos del municipio de valencia – Córdoba. [Proyecto de grado para optar al título de Magister en Enseñanza de las Ciencias, Universidad Autónoma de Manizales] Repositorio

- Institucional- Universidad Autónoma de Manizales.
<https://repositorio.autonoma.edu.co/handle/11182/980>
- Gamow, G. (1960). *Biografía de la física*. Editorial Juventud.
- Gil Flores, J. (1993). La metodología de investigación mediante grupos de discusión. *Enseñanza & Teaching: Revista Interuniversitaria de Didáctica*, 10(1), 199-214.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=95670>
- Guayara, M. (2017). La enseñanza de la teoría especial de la relatividad: reglas fijas y relojes con estudiantes de grado séptimo. [Trabajo de grado para optar por el título de licenciado en física, Universidad Pedagógica Nacional] Repositorio Institucional UPN.
<http://repository.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/2049>
- Heredia, Y; Sánchez, A. (2013). *Teorías del aprendizaje en el contexto educativo*. Recuperado de www.ebookstec.com
- Hernández, R., Fernández, C., y Batista, P. (2014). *Metodologías de la investigación* (6a ed.). McGraw Hill Interamericana.
- Hoyos, C. (2000). *Un modelo para investigación documental*. Señal Editora
- Kaku, M. (2004). *El universo de Einstein: Cómo la visión de Albert Einstein transformó nuestra comprensión del espacio y el tiempo*. Antoni Bosch Editor.
- Kuhn, Thomas S. (1982). *La tensión esencial. Estudios selectos sobre la tradición y el cambio en el ámbito de la ciencia*. Madrid: Fondo de Cultura Económica.
- Latorre, A. (2005). *La investigación-acción. Conocer y cambiar la práctica educativa*. Editorial Graó. Barcelona.
- Lipman, M. (2003). *Thinking in Education*. Cambridge University.
- Leitão, S. (2011). O lugar da argumentação na construção do conhecimento em sala de aula. Em S. Leitão & M. C. Damianovic (orgs.). *Argumentação na escola: o conhecimento em construção* (p. 13-46). Campinas, SP: Pontes.
- Leitão, S. (2012). O trabalho com argumentação em ambientes de ensino-aprendizagem: um desafio persistente. *Revista de Educação*, 12(3), 23-37.
<https://revistas.udea.edu.co/index.php/unip/article/download/15151/13196>
- Leitão, S., de Chiaro, S., & Cano, M. I. (2016). El debate crítico: un recurso de construcción del conocimiento en el aula. *Textos de didáctica de la lengua y la literatura*, 73, 26-33.
<https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5581723>

-
- Levrini, O. (2000). The substantialist view of spacetime proposed by Minkowski and its educational implications. *Science & Education*, 11(6), 601-617. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1019607F12>
- López, G. (2013). Pensamiento crítico en el aula. *Docencia e Investigación*, 37(22), 41-60. Recuperado de http://educacion.to.uclm.es/pdf/revistaDI/3_22_2012.pdf
- Lovepik.com. (n.d.). Astronauta [Imagen]. Lovepik.com. <https://es.lovepik.com/image-401941966/astronaut.html>
- Mackay Castro, R., Franco Cortazar, D. E., & Villacis Pérez, P. W. (2018). El pensamiento crítico aplicado a la investigación. *Universidad y Sociedad*, 10(1), 336-342. Recuperado de <http://rus.ucf.edu.cu/index.php/rus>
- Mach, D. E. (1919). *The science of mechanics: A critical and historical account of its development*. Nueva York: The Open Court Publishing Co.
- Mach, E (1948), *Conocimiento y error*, capítulo XI, Espasa – Galpe Argentina, S.A. 159-169
- Mettini, G. (2020). Los experimentos mentales como modelos científicos. *Revista Colombiana De Filosofía De La Ciencia*, 20(40), 199–223. <https://doi.org/10.18270/rcfc.v20i40.3237>
- Michelson, A. A., & Morley, E. W. (1887). On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, s3-34(203), 333-345. <https://doi.org/10.2475/ajs.s3-34.203.333>
- Ministerio de educación Nacional de Colombia (MEN). (1998). Lineamientos Curriculares para el área de Ciencias Naturales. https://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-89869_archivo_pdf5.pdf
- Ministerio de educación Nacional (MEN). (2001). Estándares Básicos de Competencias en Ciencias Naturales y Ciencias Sociales. La formación en Ciencias: ¡el desafío! Estándares Nacionales de Educación, 96-147. https://www.mineducacion.gov.co/1780/articles-81033_archivo_pdf.pdf
- Minkowski, H. (2012). *Space and time: Minkowski's papers on relativity*. Minkowski Institute Press.
- Newton, I. (1704). *Opticks: Or, A treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light*. London: Printed for Sam. Smith, and Benj. Walford.
- Newton, I. (1687). *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Londres: Royal Society.
- Norton, J. D. (1991). Thought experiments in Einstein's work. In J. D. Norton (Ed.), *Thought Experiments in Science and Philosophy*. Rowman & Littlefield.
- Oliva, J. M., Aragón, M. M., Soto, F., Martorell, J. J. V., Matos, J., & Marín, R. (2021). ¿Varía la masa de la Tierra? Modelizando a partir de un experimento mental. *Enseñanza de las Ciencias*, 39(2), 25-43. <https://doi.org/10.5565/rev/ensciencias.3116>

-
- Otero, M. R., Arlego, M., & Muñoz, E. A. (2019). ¿Cómo y por qué estudiar la relatividad de la simultaneidad en la escuela secundaria?. *Gondola, Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias*, 14(2), 303-321. <https://doi.org/10.14483/23464712.13929>.
- Paul, R., & Elder, L. (2005). *Standards, principles, performance indicators, and outcomes with a critical thinking master rubric*. Rowman & Littlefield.
- Peñaloza J., G. (2015). A view point based on didactic methods in Science on the concept of world vision. *Educación y Humanismo*, 17(29), 156–168. <https://doi.org/10.17081/eduhum.17.29.1259>
- Peña Díaz, J.M. y Cruz Bonilla, Y.J. 2019. Diagramas de Minkowski, evidencia geométrica de las consecuencias de la Teoría Especial de la Relatividad (TER). *Revista Científica*. (feb. 2019), 17–25.
- Pérez, H. y Solbes, J. (2003) Algunos problemas en la enseñanza de la relatividad. *Enseñanza de las Ciencias*, 21(1), 135-146
- Pérez, H. y Solbes, J. (2006) Implicaciones de la evolución histórica de algunos conceptos en la enseñanza de la relatividad. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 3(3), 408-430.
- Piñuel, J. (2002). Epistemología, metodología y técnicas del análisis del contenido. *Estudios de sociolingüística*. 3(1). pp. 1 - 42.
- Pozo, J. I., & Gómez Crespo, M. A. (1998). *Aprender y enseñar ciencia*. Morata.
- Prado, X., Domínguez-Castiñeiras, J. M., Area, I., Paredes, Á., & Mirá, J. (2020). *La enseñanza de la teoría de la relatividad restringida de Einstein, estado de la cuestión*. *Revista Eureka sobre Enseñanza y Divulgación de las Ciencias*, 17(2), 2102. https://doi.org/10.25267/Rev_Eureka_ensen_divulg_cienc.2020.v17.i2.2102
- Rips, L. J. (1998). Reasoning and conversation. *Psychological Review*, 105(3), 411–441.
- Rodríguez, M; García, M. (2000). El enfoque crítico-reflexivo en la educación. *Experiencias en el aula*. *Revista Educación* No 99, enero, La Habana (p. 8-11).
- Romero Chacón, Á. E. (2013). Reflexiones acerca de la naturaleza de las ciencias como fundamento de propuestas de enseñanza: El caso de la experimentación en la clase de ciencias. En A. E. Romero Chacón, B. L. Henao Sierra, & J. F. Barros Martínez (Eds.), *La argumentación en la clase de ciencias: Aportes a una educación en ciencias en y para la civilidad fundamentada en reflexiones acerca de la naturaleza de las ciencias* (pp. 71–98). Universidad de Antioquia.
- Romero, Á. E., Henao, B. L., & Barros, J. F. (2013). *La argumentación en la clase de ciencias: aportes a una educación en ciencias en y para la civilidad fundamentada en reflexiones acerca de la naturaleza de las ciencias*. Universidad de Antioquia.

-
- Romero, A; Aguilar, Y. (2011). A propósito de los experimentos mentales: Una tentativa para la construcción de explicaciones en ciencias. Universidad Pedagógica Nacional. Revista científica. Volumen extra.
- Ruvalcaba, J; Quintero, R; Gómez, A. (2022). Enseñanza de las Ciencias. Revista de investigación y experiencias didácticas. Volumen 40. (p. 5-24).
- Runge, A. (2013). Hermenéutica. Paradigma Interpretativo. Trabajo presentado en Seminario de Maestría de Educación y Pedagogía para Posgrados. Universidad de Antioquia.
- Salgado, R. J., Gavilanes, A. E., & Muñoz, Z. E. (2021). Caracterización de la enseñanza de la física relativista, caso: Departamento de Nariño. Revista Historia de la Educación Colombiana, 123-147. <https://doi.org/10.1234/revista.2021.123>
- Sandoval, C. (2020). Consideraciones epistemológicas en torno a la investigación cualitativa. Trabajo presentado en Seminario doctoral de análisis cualitativo. Universidad de Antioquia.
- Schutz, B. F. (2009). A first course in general relativity. Cambridge University Press.
- Scratch. (n.d.). Imágenes de dos personas en movimiento. Scratch. <https://scratch.mit.edu>. Licencia CC BY-SA 2.0.
- Smith, J. H. (2021). Introducción a la relatividad especial. Reverte.
- Stake, R. (1999). Investigación con estudio de casos. Madrid: Ediciones Morata.
- Stickpng.com. (n.d.). Cohete volador [Imagen]. Stickpng.com. <https://www.stickpng.com/es/img/il-transporte/naves-espaciales/cohete-volador>
- Swartz, R. (2012). Infusing instruction in thinking into content instruction: What do we know about its success?. Sri Lankan Journal of Educational Research, 3(1), 45-60. https://www.academia.edu/10625997/INFUSING_INSTRUCTION_IN_THINKING_INTO_CONTENT_INSTRUCTION_WHAT_DO_WE_KNOW_ABOUT_ITS_SUCCESS.
- Tamayo, O; Zona, R; Loaiza, Y. (2015). El pensamiento crítico en la educación. Algunas categorías centrales en su estudio. Revista Latinoamericana de Estudios Educativos, 11(2), 111-133.
- Toulmin, Stephen (1977). La comprensión humana: el uso colectivo y la evolución de los conceptos. Madrid: Alianza.
- Universidad de Antioquia. (2016). Código de ética en investigación de la Universidad de Antioquia. <https://www.udea.edu.co/wps/wcm/connect/udea/e79da6b4-1402-496b-88bc-0dc0321ba827/codigo-etica-udea.pdf?MOD=AJPERES>
- Vygotsky, L. (2000). El desarrollo de los procesos psicológicos superiores. Editorial Crítica.

-
- Wald, Robert M. (1992). *Espacio, tiempo y gravedad: la teoría del Big Bang y los agujeros negros* (2ª ed.). Chicago: Prensa de la Universidad de Chicago
- Williams, L. P. (1989). Relativity theory: Its origins and impact on modern thought. *Physics Today*, 23(4), 67. <https://doi.org/10.1063/1.3022079>
- Zaldívar, M; Sosa, Y; López, J. (2005). Definición de la flexibilidad del pensamiento desde la enseñanza. *Revista Iberoamericana de Educación*. Volumen 37. (p. 1-4).

Anexos

Propuesta pedagógica

Actividad de acercamiento: Diagrama de espacio-tiempo relativista

Información general de la actividad propuesta:

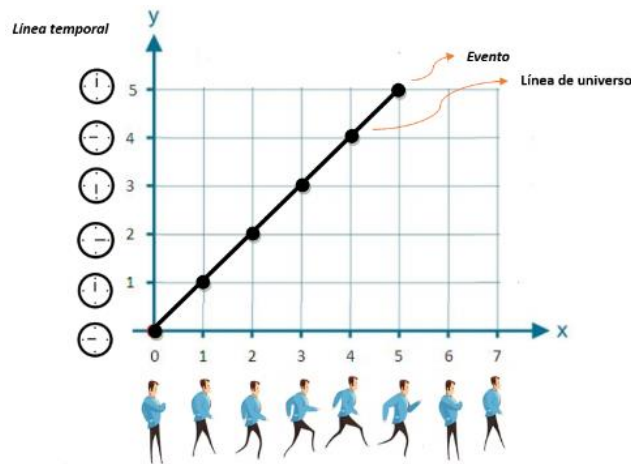
Objetivos:

- Identificar las partes de un diagrama de espacio-tiempo a través de un sistema de coordenadas bidimensional
- Reconocer el concepto de evento y línea de universo, además de su representación en el espacio-tiempo.

Para la elaboración de un diagrama de espacio-tiempo, se presenta un plano cartesiano de dos dimensiones cuyo eje horizontal representa la dimensión espacial, que para efectos prácticos del diagrama sólo se considera una dimensión espacial; no obstante, existen tres dimensiones espaciales (largo, ancho y alto). Adicionalmente el eje vertical representa la dimensión temporal. Para los propósitos de construir un diagrama de espacio-tiempo es de suma importancia definir el concepto de **evento y línea de universo**. Desde la cotidianidad se define evento como un hecho o una eventualidad ocurrida en un tiempo y lugar definidos, no obstante, en términos del espacio-tiempo como una unidad, el **evento** se va a considerar en adelante como “cualquier punto del espacio, en cualquier instante del tiempo” (Wald, 1982, p.11), aunque allí no esté ocurriendo nada interesante; por lo tanto, un punto en el plano cartesiano con una dimensión espacial y otra temporal representa un **evento**. En general, “el conjunto de todos los eventos abarca la totalidad del espacio y el tiempo” (Wald, 1982, p.11). (Véase figura 1).

Una **línea de universo** se define como la trayectoria de una partícula u objeto en el espacio-tiempo, o de forma equivalente como una sucesión de eventos. Para los propósitos de la actividad de acercamiento consideramos la comparación de la línea de universo de una persona con su “línea de vida”, la cual describe los eventos pasados, presentes y esperados (futuros) a lo largo de nuestro transitar en la vida.

Ilustración 42. Diagrama de espacio-tiempo representado en un sistema de coordenadas de dos dimensiones.

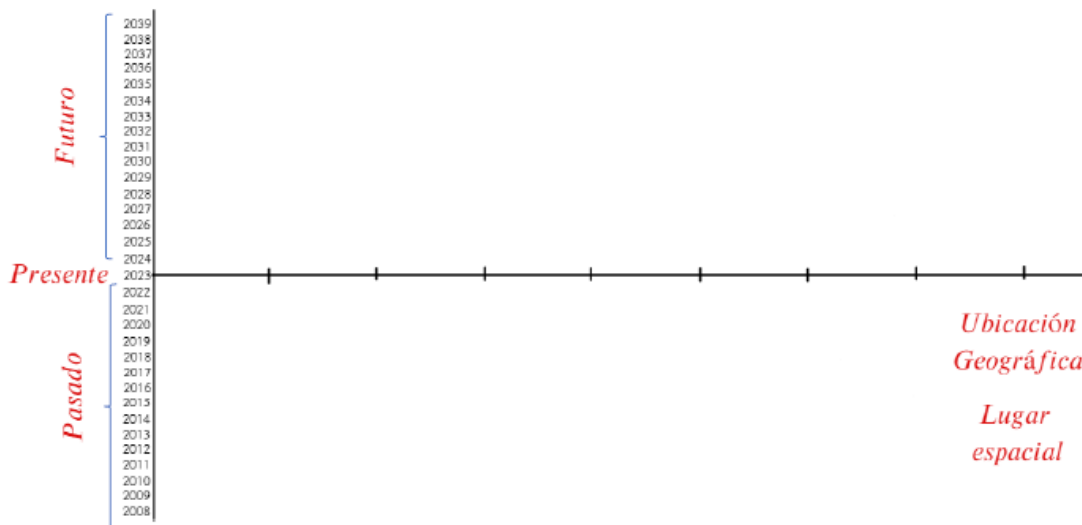


Actividad:

Considere el siguiente diagrama de espacio-tiempo, mostrando los eventos en el espacio-tiempo, cuyo eje horizontal representa la ubicación geográfica o el lugar espacial donde ocurre el evento y el eje vertical representa el eje temporal (año de realización del evento).

1. Ubica en el diagrama de espacio-tiempo (ubicado en la página siguiente), los eventos pasados, presentes y futuros que consideras de suma importancia a lo largo de tu vida. Escribiendo en el eje horizontal la ubicación geográfica o el lugar en donde ocurrieron los hechos. Une cada uno de los eventos (pasados, presentes y futuros) con una línea, también llamada línea de universo.

Ilustración 43. Acercamiento de un diagrama de espacio tiempo-relativista.



2. ¿Cuáles eventos del pasado o presente ocurrieron el mismo año?, ¿Por qué?

Actividad 2.

Trazar en un diagrama de espacio-tiempo la **línea de universo** de las siguientes situaciones (Emplea papel periódico como insumo para la actividad):

- a. Línea de universo de una persona en reposo.
 - b. Línea de universo de una persona que se desplaza de un punto A a un punto B en un intervalo de tiempo dado.
 - c. Línea de universo de una persona que se devuelve del punto B al punto A, utilizando menos tiempo que el caso anterior.
 - d. Línea de universo de un encuentro entre dos personas que partieron desde dos puntos lejanos y se desplazaron en sentidos opuestos.
 - e. Línea de universo de dos personas, separadas una cierta distancia, que se lanzan una pelota sin parar.
 - f. Línea de universo de una persona en reposo, que ve a otra moviéndose con gran velocidad.
4. Supón la siguiente situación imaginaria: El transitar de una persona durante su línea de vida que se realiza a una velocidad comparable con la de luz. Imagina y narra tu experiencia imaginaria indicando: a) ¿Cuáles sería sus efectos biológicos?, b) ¿cuál sería su percepción del tiempo y del espacio? c) Realiza un dibujo de cómo se vería esta persona. (Emplea el papel periódico como insumo para la actividad):

Referencias:

[1] Wald, R, M. (1992). Espacio, tiempo y gravedad: la teoría del Big Bang y los agujeros negros (2ª ed.). Chicago: Prensa de la Universidad de Chicago

Actividad 3.

Información general de la actividad propuesta:

Objetivos

- Identificar la simultaneidad de dos o más eventos a través de representaciones de espacio-tiempo relativista.
- Reconocer el movimiento de un cuerpo, a través de su línea de universo.

Requisitos o tareas:

- Identificar el concepto de marco de referencia inercial y observador estacionario.
- Reconocer el concepto de línea de universo y su aplicación en el espacio-tiempo.

Reflexión acerca de la simultaneidad de sucesos en el espacio-tiempo.

Para los propósitos del siguiente ejercicio mental consideramos la siguiente situación y las observaciones para resolver las actividades propuestas.

Situación 1

A través del siguiente enlace, ingresa a la representación de un diagrama de espacio-tiempo relativista, realizado en GeoGebra: <https://www.geogebra.org/m/y9sjfigi>

1. Se presentan una serie de eventos **E1**, **E2**, **E3**, **E4**, **E5** y **E6** que se representan en GeoGebra con los siguientes puntos:

Tabla 7. Eventos nombrados E1, E2, E3, E4, E5 y E6, las cuales se representan con símbolos en Geogebra.

E1	
E2	
E3	
E4	

E5	×
E6	●

Se presenta un diagrama de espacio-tiempo relativista, en donde Juan (Observador O) se encuentra en reposo a medida que transcurre el tiempo, mientras que Rigo (Observador O'), viaja en una nave con una rapidez de $0,12c$, (Véase figura 42). acontecen una serie de eventos, los cuales son explosiones muy cercanas a la superficie terrestre que tienen atónito a Juan.

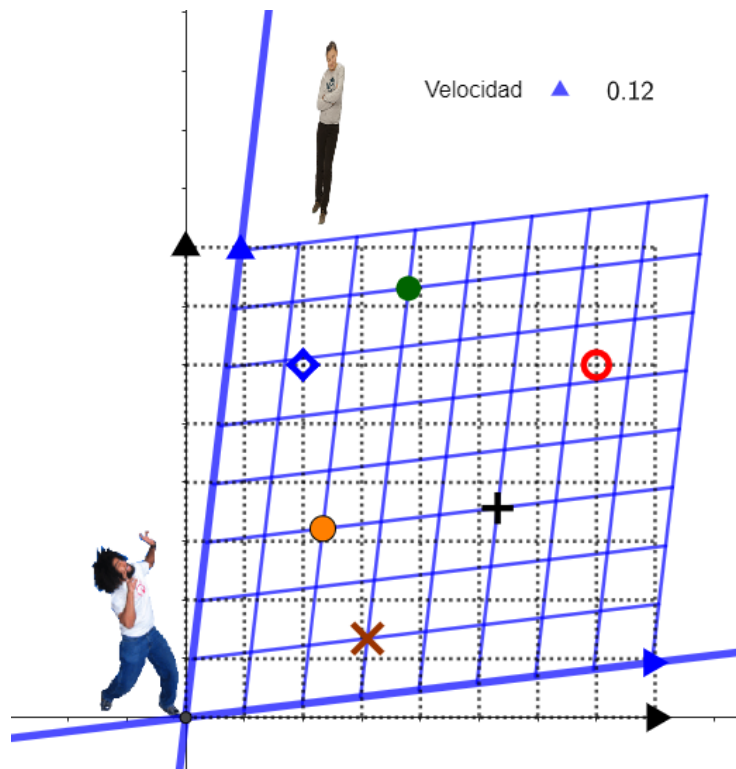


Ilustración 44. Diagrama de espacio-tiempo relativista. El marco de referencia de Juan representado de color negro, y el marco de referencia de Rigo de color azul.

Observaciones:

1. En la representación de espacio-tiempo construido en GeoGebra, el eje de ordenadas (y) representa el eje temporal, mientras que el eje de abscisas (x) representa el eje de posición.

2. El eje “y” de color negro, representa la trayectoria de Juan (Observador O) en reposo. Si se arrastra el punto de flecha de color negro Δ , se distorsiona el marco de referencia del observador O. Mientras que el eje “y” de color azul, representa la trayectoria de la nave, donde viaja Rigo (Observador O’).
3. Se considera que dos o más eventos son **simultáneos** si ocurren en el mismo tiempo o en el mismo lugar.
4. La trayectoria que describe el movimiento de un objeto a lo largo del diagrama de espacio-tiempo se denomina *línea mundial o línea de universo*. Wald (1992). También es una línea recta que conecta dos sucesos u eventos.

Actividad

1. ¿Cuáles explosiones ocurrieron de forma simultánea (al mismo tiempo) para Juan (Observador O)?
¿Por qué?

2. ¿Cuáles explosiones ocurrieron de forma simultánea (al mismo tiempo) para Rigo (Observador O’)?
¿Por qué?

3. ¿Cuáles explosiones ocurrieron en el mismo lugar para el marco de Juan?, ¿Y para el marco de Rigo?

4. Responde las siguientes preguntas, escogiendo la opción correcta y escribiendo su justificación en el recuadro de la opción elegida:

a. Si Juan ve el Marco de referencia de Rigo, asume que los eventos E1 y E4 son:

Opción 1. Simultáneos, ya que...

Opción 2. Ocurren en tiempos distintos, ya que...

Opción 3. Ocurren en el mismo lugar, debido a que...

b. Si Juan ve el Marco de referencia de Rigo, asume que los eventos E2 y E6 son:

Opción 1. Simultáneos, ya que...

Opción 2. Ocurren en tiempos distintos, ya que...

Opción 3. Ocurren en el mismo lugar, debido a que...

Referencias:

[1] Wald, Robert M. (1992). Espacio, tiempo y gravedad: la teoría del Big Bang y los agujeros negros (2ª ed.). Chicago: Prensa de la Universidad de Chicago.

Actividad 4. Experimentación mental y su contribución al desarrollo de nociones relativistas parte 1

Objetivos:

- Identificar las etapas para la construcción de un experimento mental a partir de una paradoja o situación hipotética.
- Reconocer en un diagrama de espacio-tiempo una línea de sucesión de eventos derivada de una experiencia mental.
- Reconocer el concepto de evento y línea de universo y su aplicación en un diagrama de espacio-tiempo.

A continuación, se enuncian una serie de principios relativistas que serán insumo y condición para construir un experimento mental relativista.

1. Las leyes de la física son las mismas para todos los observadores que presentan un estado natural de movimiento (estado de reposo o movimiento en línea recta con velocidad constante).
2. La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores que presentan un estado natural de movimiento (estado de reposo o movimiento en línea recta con velocidad constante).

Actividad:

De acuerdo con la situación hipotética planteada en la tabla 1, construye un experimento mental completando cada uno de los ítems que se muestran en la tabla 2 dando respuesta a la situación hipotética planteada:

“En el mundo newtoniano podemos alcanzar cualquier objeto en movimiento si nos movemos suficientemente rápido” (Kaku, 2005, p.31).

Situación hipotética 1

Un transeúnte en reposo sobre la acera evidencia detenidamente que un policía inicia una persecución a un infractor de tránsito, que se mueve sobre una vía recta superando la velocidad límite permitida. Un breve tiempo después, el transeúnte percibe que el policía rebasa al infractor y le obliga a detenerse. Imagina la situación hipotética que el infractor de tránsito se moviese a la velocidad de la luz (o fuese un rayo de luz emitido por un faro). Teniendo en cuenta estas circunstancias, ¿en qué condiciones el policía podría rebasar al infractor?

Tabla 1. Situación hipotética relativista.

Experimento mental número ____

A continuación, se presentan los pasos para desarrollar un experimento mental. Tómate tu tiempo para pensar la situación hipotética planteada en la tabla 1, luego responde cada ítem en el espacio de cada recuadro.

Tabla 8. Guía de experimentación mental

- | | |
|--|--|
| 1. ¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en tu experiencia mental? | 2. ¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes a ser analizadas para dar respuesta a la pregunta planteada? |
| 3. ¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en tu experimento mental? | 4. Describo un escenario en dónde ocurrirán los hechos y narra tu experiencia mental. |

5. ¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente tu experiencia mental?	6. ¿Cuáles consideras que son los conocimientos de los cuales necesitas un mayor nivel de apropiación?
--	---

7. Ubica los eventos y líneas de universo que representan tu experiencia mental en un diagrama de espacio tiempo (dibújalo):	8. De acuerdo con la experiencia imaginaria construida. ¿Cuáles son las conclusiones de tu experimento mental que dan respuesta a los objetivos planteados?
---	--

Tabla 9. Situación hipotética relativista.

Actividad 4: Experimentación mental y su contribución al desarrollo de nociones relativistas. Parte 2

Objetivos:

- Identificar las etapas para la construcción de un experimento mental a partir de una paradoja o situación hipotética.
- Reconocer en un diagrama de espacio-tiempo una línea de sucesión de eventos derivada de una experiencia mental.
- Reconocer el concepto de evento y línea de universo y su aplicación en un diagrama de espacio-tiempo.

A continuación, se enuncian una serie de principios y leyes relativistas que serán insumo para construir un experimento mental relativista.

3. Las leyes de la física son las mismas para todos los observadores que presentan un estado natural de movimiento (estado de reposo o movimiento en línea recta con velocidad constante).
4. La velocidad de la luz en el vacío es la misma para todos los observadores que presentan un estado natural de movimiento (estado de reposo o movimiento en línea recta con velocidad constante).

Actividad:

De acuerdo con la situación hipotética planteada en la tabla 1, construye un experimento mental (conforme a la guía anterior) completando cada uno de los ítems que se muestran en la tabla 2 dando respuesta a la situación hipotética planteada:

Situación hipotética 2

Un astronauta y un viajero espacial se encuentran en el espacio exterior, con la preocupación de que sólo queda un tanque de oxígeno para volver a la tierra, por lo cual hacen una apuesta de vida o muerte, cada uno con la seguridad de ganar la apuesta. Consiste en que el primero que impacte un rayo de luz a una lámina de metal dispuesta verticalmente a miles de kilómetros de distancia podrá disponer del tanque de oxígeno. Ambos iniciarán en el mismo punto y un observador les dará la orden de salida. Sin embargo, en el inicio de la carrera, el astronauta se encontrará en reposo y únicamente podrá emitir el rayo de luz, mientras que el viajero espacial dispondrá de la nave para desplazarse hacia la lámina de metal y en el mismo instante en que emita el rayo, encenderá la nave en búsqueda de la lámina. Habrá un segundo observador que estará ubicado al lado de la lámina para saber que rayo impactó primero, vale aclarar que el rayo de cada uno es de diferente color, por lo cual se sabrá el ganador con certeza. ¿Quién ganará la apuesta?, ¿Por qué?

Referencias

[1] Kaku, M. (2005). El universo de Einstein: cómo la visión de Albert Einstein transformó nuestra comprensión del espacio y el tiempo. Barcelona: Crítica.

Actividad 5. Modelo de Debate Crítico

Astronauta vs. viajero espacial. ¿Cuál de los dos ganará?

Objetivos:

- Identificar argumentos de calidad a través del consenso y disenso en un debate de modalidad crítica.
- Revisar perspectivas contrarias, individuales y colectivas para la construcción de conocimiento en interacción con otros.
- Realizar a nivel personal las experiencias mentales 1 y 2 indicadas en las guías de trabajo.

A continuación, se enuncian las etapas para la construcción de un Debate Crítico propuesto por Selma Leitao, se presentan algunas adecuaciones por motivos de claridad:

Introducción al tema

Buenas tardes, damos inicio al primer Debate Crítico siendo las 3:15, del día 30 del mes de Octubre del año 2023, con la finalidad de dar cumplimiento con las etapas de recolección de la información en el marco de la investigación titulada: La experimentación mental en la clase de física: su contribución al desarrollo del pensamiento crítico y a la construcción de nociones de espacio-tiempo relativista.

El Debate Crítico se orientará a la generación de argumentos con base a los experimentos mentales generados mediante experiencia individual, que serán puestos a prueba a través de los juicios de valor, ideas y la defensa de argumentos generados en los grupos de discusión. El tema que se abordará durante el Debate Crítico es la cinemática relativista, enfocada en el movimiento de cuerpos a velocidades cercanas a las de la luz.

Los participantes de este encuentro son estudiantes de educación media (grado séptimo, octavo, noveno, décimo y once) del Instituto Cristo Rey de Itagüí. Se conformarán tres grupos mediante sorteo, cada uno con un número de cuatro (4) participantes con un rol previamente establecido: **El grupo 1 o proponente (G.P)**, iniciará el debate proponiendo una posición que será contraargumentada por el **grupo 2 u oponente (G.O)**, el cual tendrá una perspectiva diferente de la situación planteada.

2. Taller de preparación para el debate.

Se presenta la situación hipotética abordada en la actividad 2 de experimentación mental:

Situación hipotética

Un astronauta y un viajero espacial se encuentran en el espacio exterior, con la preocupación de que sólo queda un tanque de oxígeno para volver a la tierra, por lo cual hacen una apuesta de vida o muerte, cada uno con la seguridad de ganar la apuesta. Consiste en que el primero que impacte un rayo de luz a una lámina de metal dispuesta verticalmente a miles de kilómetros de distancia podrá disponer del tanque de oxígeno. Ambos iniciarán en el mismo punto y un observador les dará la orden de salida. Sin embargo, en el inicio de la carrera, el astronauta se encontrará en reposo y únicamente podrá emitir el rayo de luz, mientras que el viajero espacial dispondrá de la nave y en el mismo instante en que emita el rayo, encenderá la nave en búsqueda de la lámina. Habrá un segundo observador que estará ubicado al lado de la lámina para saber que rayo impactó primero, vale aclarar que el rayo de cada uno es de diferente color, por lo cual se sabrá el ganador con certeza.

- **En el grupo proponente (G.P):** ¿En qué condiciones puede ganar la apuesta el astronauta?
- **En el grupo oponente (G.O):** ¿En qué condiciones puede ganar el viajero espacial?

b) Teniendo las ideas de cada uno de los miembros del equipo, escoger cuales son más razonables para ser presentadas en debate.

c) ¿Cuáles fueron los criterios para escoger las ideas a ser presentadas?

3. Debate

El objetivo es que el grupo proponente y oponente defiendan un caso planteado derivado de la situación hipotética. Se espera que cada uno de los participantes aporten a los argumentos del grupo y puedan participar de forma activa, con una actitud respetuosa a las opiniones del equipo contrario. Cada participación en el debate tendrá una duración de 3 minutos y la reunión de revisión de perspectivas de 5 minutos. Las intervenciones de cada grupo se distribuyen así:

Etapas de debate cerrado:

G.P: Presenta sus argumentos.

G.O: Pregunta al grupo contrario las inquietudes y fuentes empleadas para respaldar sus argumentos.

G.P: Responde de forma breve.

G.O: Presenta sus contraargumentos, explicando porque no son posibles las respuestas del grupo contrario.

G.P: Pregunta al grupo contrario las inquietudes y fuentes empleadas para respaldar sus argumentos.

G.O: Responde de forma breve.

G.P: Presenta sus contraargumentos, explicando porque no son posibles las respuestas del grupo contrario.

G.O y G.P: Se reúnen para evaluar internamente sus respuestas y las respuestas del equipo contrario.

Etapas de debate abierto:

G.P: Presenta un nuevo argumento.

G.O: Responde al oponente y presenta un nuevo argumento.

G.P: Responde al G.O y presenta un nuevo argumento.

G.O: Responde al G.P y presenta un nuevo argumento.

G.O y G.P: Se reúnen para evaluar internamente sus respuestas y las respuestas del equipo contrario.

Etapas de preguntas:

G.P: Formula una pregunta al G.O

G.O: Responde a la pregunta y formula una pregunta al G.P

G.P: Responde a la pregunta del G.O

Etapas de cierre:

G.P: Declaran continuar con su posición, o adoptan la posición del equipo contrario, expresar sus argumentos.

G.O: Declaran continuar con su posición, o adoptan la posición del equipo contrario, expresar sus argumentos.

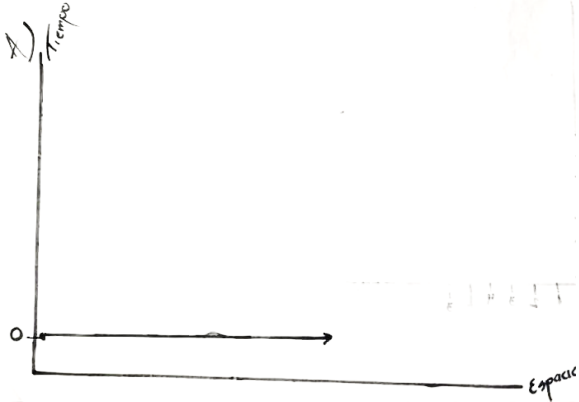
4. Conclusiones

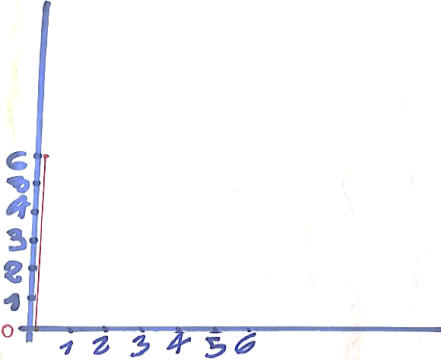
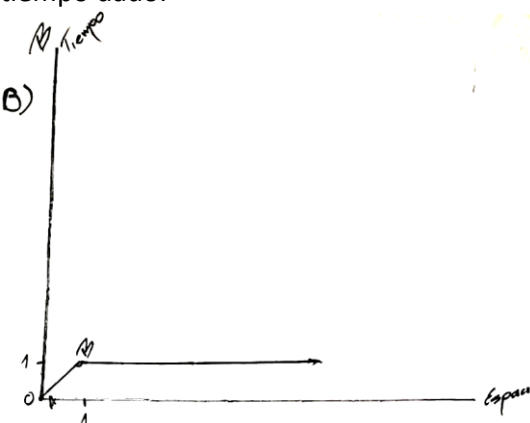
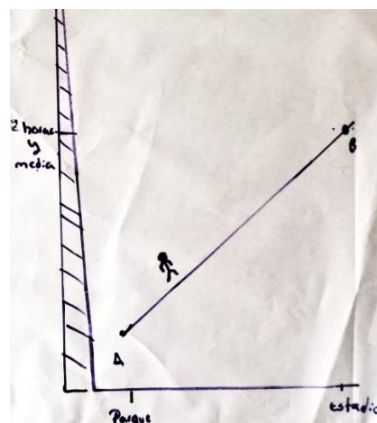
- El ganador de la apuesta entre el astronauta y el viajero espacial es, ya que:

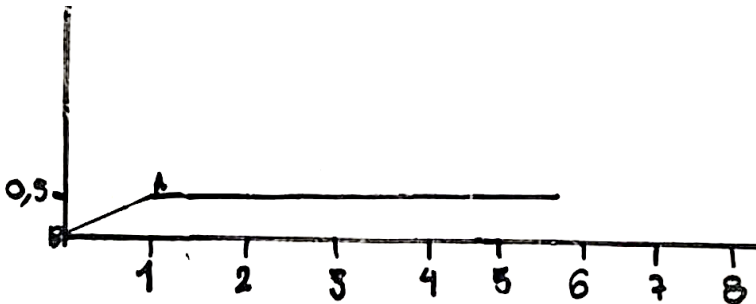
[1]. Leitão, S. (2016). [El debate crítico: un recurso de construcción del conocimiento en el aula](#)*Textos de didáctica de la lengua y la literatura, Año XXII(73), 26-33*

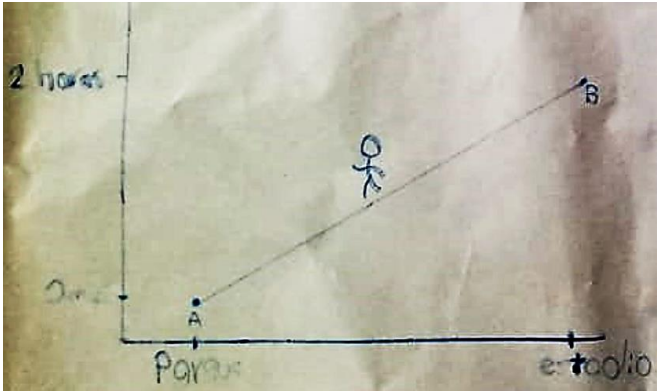
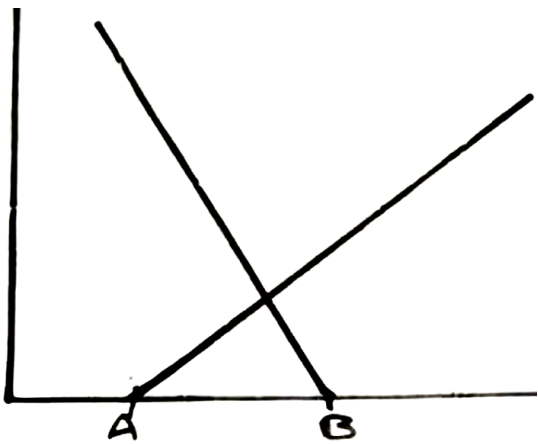
Transcripción Debate 1. Grupo de discusión

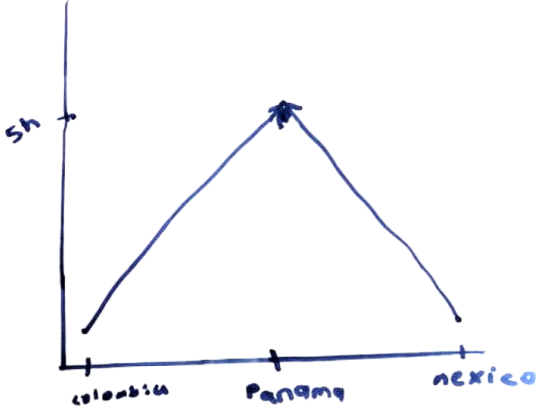
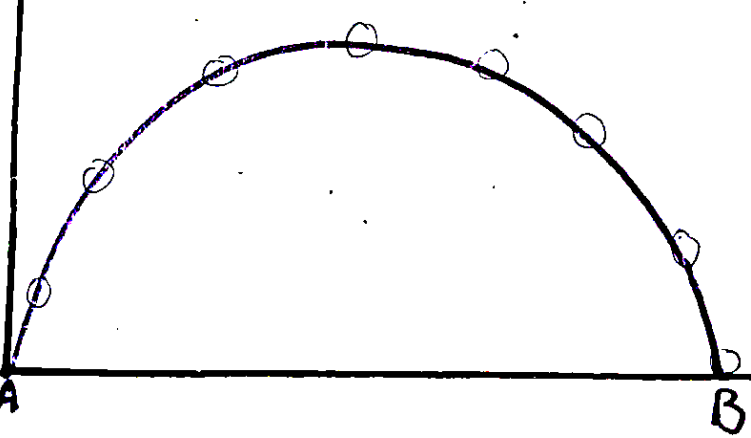
Tabla 10. Transcripción Debate 1

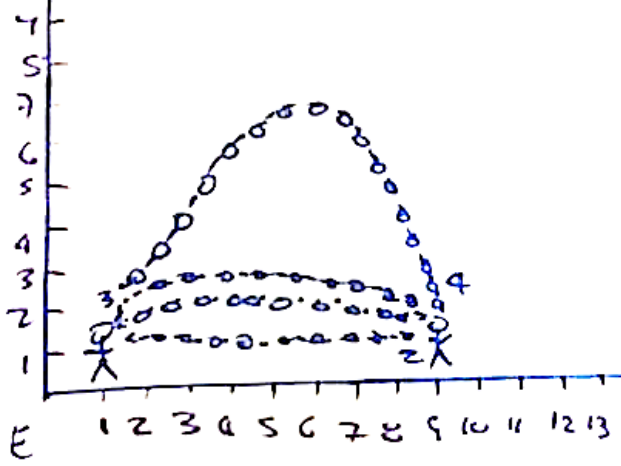
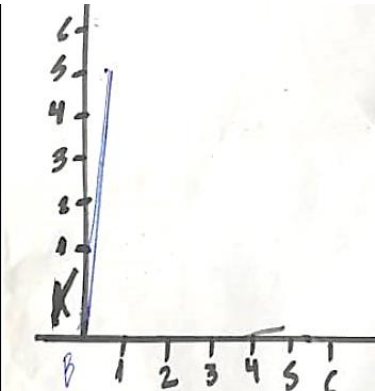
Diagramas de espacio-tiempo elaborados por GP y GO	Discusión
GP: Situación a. Línea de universo de una persona en reposo. 	1.Interpretación de la gráfica situación a del GP: “La gráfica, está “al revés”, pero, el tiempo siempre transcurre y al estar el cuerpo estático no recorrerías en el espacio, aunque, si tomamos el tema de una forma más... fuera de lo que estamos viendo cómo espacio: el cuerpo nunca está en reposo, puesto que siempre va a estar en una órbita en un planeta”. 2.Contraargumento del participante H del GO: “Usted sabe que el espacio siempre se está expandiendo, entonces, siempre tiene que ir aumentando”. 3.Respuesta del participante E del GP: “Obvio, pero ahí está en reposo mi amigo”. 4.Contrargumento del participante H del GO: “Si fuera así, tuvieron que haber hecho la recta en diagonal, porque el tiempo sigue aumentando, tendría que hacer el tiempo... Poniendo años, meses o segundos”.
GO: Situación a. Línea de universo de una persona en reposo.	1.Interpretación de la gráfica situación a del GO: “línea de universo de una persona en reposo: No aumenta la distancia, pero si el tiempo, sencillo”.

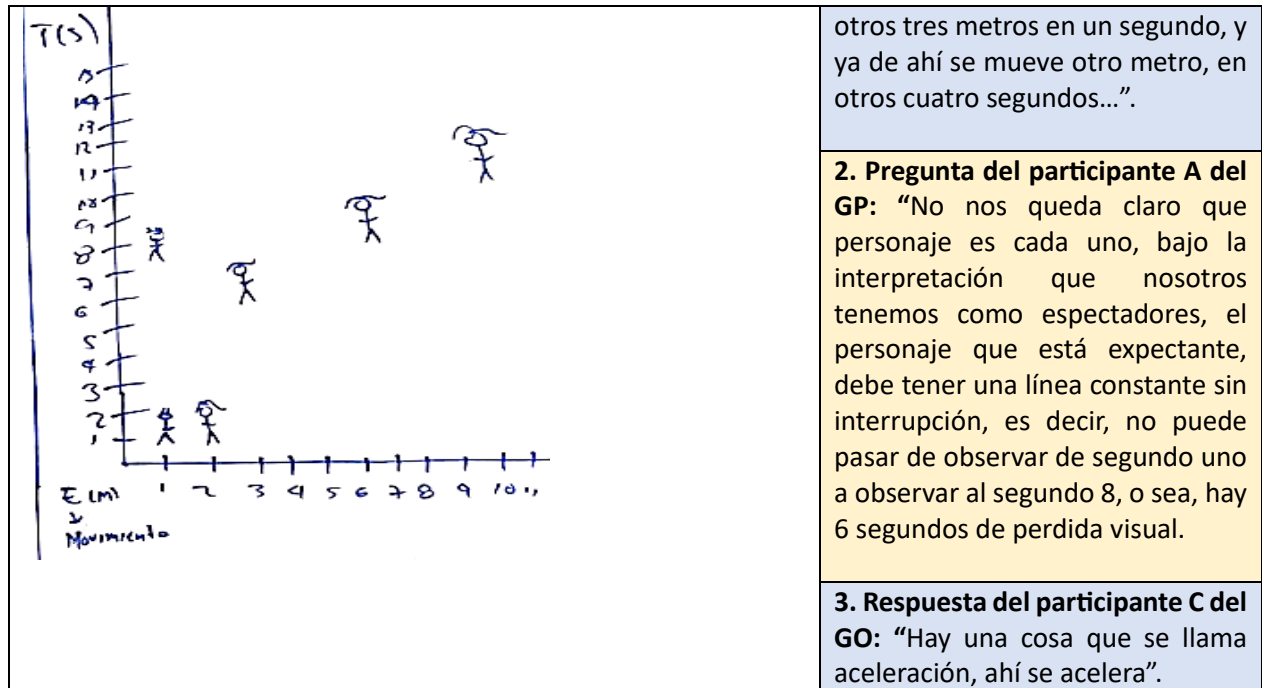
	2.No hubo preguntas o contraargumentos de GP.
GP: Situación b. Línea de universo de una persona que se desplaza de un “punto A” a un “punto B” en un intervalo de tiempo dado. 	1.Interpretación de la gráfica situación b del GP: “En el caso número dos nos proponen que está del punto A al punto B, en un tiempo predeterminado, entonces podemos ver que la recta parte desde el segundo cero y desde el espacio cero, hasta el punto de espacio 1 y tiempo 1. Al llegar a este punto el cuerpo entra en reposo y por eso se establece esta fase”. 2.No hubo preguntas o contraargumentos de GO.
GO: Situación b. Línea de universo de una persona que se desplaza de un “punto A” a un “punto B” en un intervalo de tiempo dado. 	1. Interpretación de la gráfica situación b del GO: “Pusimos que la persona se desplazaba del parque al estadio en un tiempo de dos horas y media”. 2.Contraargumento del participante C del GP: “Lo que estoy viendo ahí, es que parten desde el metro 1 y el segundo 1, es decir, ya pasó distancia y tiempo antes de que el personaje arrancara”. 3.Respuesta del participante H del GO: “Ahí no dice, que estaba en reposo mi hermano”.

	4.Respuesta del participante K del GO: “El parque no está en el punto cero, en el punto cero está la casa de la persona”. 5.Contraargumento del participante A del GP: “Pero ahí nos están diciendo que se parte del punto A, que equivale al punto cero, al punto de partida” 6.Contraargumento del participante D del GP: (interrumpe abruptamente) “... Siendo el punto A el punto cero”. 8.Exclamación del GO: “Nooo, no”. 9.Exclamación del participante L del GO: “Para usted el punto siempre se tomaría como cero”.
GP: Situación c. Línea de universo de una persona que se devuelve del punto B al punto A, utilizando menos tiempo que el caso anterior. 	1. Interpretación de la gráfica situación c del GP: “En este lo que se propone es que se recorre del punto al que se llegó al punto de partida anterior, lo que cambia es que es en un tiempo menor, entonces en este caso pasamos de recorrerlo en un segundo a recorrerlo en un tiempo de 0,5 segundos”. 2.Pregunta del participante G del GO: “¿Ustedes pararon el tiempo?, ¿La persona sigue avanzando?”. 3.Respuesta del participante B del GP: “Para que se pueda generar la respuesta correcta se debe poner en negativo (el desplazamiento), pero en el plano lo pusimos en el positivo puesto que ya habíamos hecho la gráfica, en este caso la persona se devuelve del punto A al B”.
GO: Situación c. Línea de universo de una persona que se devuelve del punto B al punto A, utilizando menos tiempo que el caso anterior.	1.Interpretación de la gráfica situación c del GO: “Cogimos otra vez el mismo punto de ahorita que iba del parque al estadio, pero

	esta vez iba del estadio para el parque”.
GP: Situación d. Línea de universo de un encuentro entre dos personas que partieron desde dos puntos lejanos y se desplazaron en sentidos opuestos. 	2. No hubo respuestas o contraargumentos de GP. 1. Interpretación de la gráfica situación d del GP: “En el caso número 4 se propone que dos personas parten de puntos distintos a una velocidad distinta y en un punto se van a encontrar, entonces, parte uno del punto A y el otro del punto B”. 2. Pregunta del GO: “¿Cómo así?”. 3. Respuesta del GP: “El ejercicio nos plantea dos personas parten desde dos puntos lejanos distintos, en contra, ósea, salen de puntos distintos, pero en direcciones diferentes. Nosotros lo planteamos: Uno sale hacia la izquierda y el otro hacia la derecha y en el centro se encuentran que es lo que nos piden en el ejercicio”.
GO: Situación d. Línea de universo de un encuentro entre dos personas que partieron desde dos puntos lejanos y se desplazaron en sentidos opuestos.	1. Interpretación de la situación d del GO: “La gráfica habla por sí misma, uno arranca desde un punto más cercano, y luego van pasando y se juntan”. 2. Pregunta del participante A del GP: “Está bien, mi pregunta es: El desplazamiento finaliza en el encuentro y vuelve y pasa lo

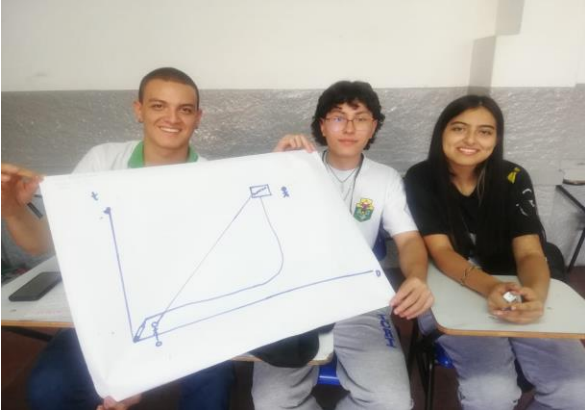
	mismo. Inicia desde un punto más adelante”. 3. Pregunta del participante C del GP: “Se da un bucle o se queda solo quieto”. 4. Pregunta del participante B del GP: “Siguiendo su lógica, como usted me lo está exponiendo el personaje uno alcanza su distancia máxima en cierto tiempo y ahí inicia a su descenso” 5. Respuesta del GO: “El personaje sigue subiendo y éste también sigue subiendo, hasta cruzarse”.
GP: Situación e. Línea de universo de dos personas, separadas una cierta distancia, que se lanzan una pelota sin parar. 	1. Interpretación de la gráfica situación e del GP: “En el enunciado nos dicen que dos personas, en un sitio fijo no dejan de lanzarse una pelota, durante un período de tiempo, ahí estamos presentando que hay una secuencia de las bolas que representa el pase de la “persona A” a la “persona B””. 2. No hubo respuestas o contraargumentos de GO.
GO: Situación e. Línea de universo de dos personas, separadas una cierta distancia, que se lanzan una pelota sin parar.	1. Interpretación del participante K del GO: “Se tiran una pelota a una distancia de 8 metros, podemos ver que éste le lanza la pelota al otro y se divide 8 metros en 1 segundo (ósea que el personaje la tiró como durito), ya después se la devolvió 8 metros en segundo y medio... Y así

	sucesivamente, hasta que éste le dio rabia y ya la tiró por encima y entonces se demoró más tiempo. Y así sucesivamente. Cada vez van cambiando la fuerza del lanzamiento”. 2. Pregunta del participante B del GP: “¿Por qué descende en tiempo?”. 3. Pregunta del participante A del GP: “¿Por cuánto tiempo se da cada uno?, o sea si lo tira más bajo debería dar menos tiempo, ¿o algo así?”. 4. Respuesta del GO: “No descende el tiempo, lo que descende es la pelota”.
GP: Situación f. Línea de universo de una persona en reposo, que ve a otra moviéndose con gran velocidad. 	1. Interpretación de la gráfica situación 6 del GP: “Y en el punto f: De una persona que se está moviendo a gran velocidad, entonces significa más distancia que tiempo”. 2. No hubo respuestas o contraargumentos de GO.
GO: Situación f. Línea de universo de una persona en reposo, que ve a otra moviéndose con gran velocidad.	1. Interpretación de la situación f del GO por el participante K: “Una persona en reposo, ve a otra persona moviéndose rápidamente, entonces, este está en 8 segundos no se movió nada, por ende, está en reposo, luego este empieza moviéndose despacio, porque recorre 1 metro en 6 segundos (va despacio), pero de ahí coge y aumenta, porque ya se mueve



Transcripción Debate 2. Grupo de discusión

Tabla 11. Transcripción Debate 2.

GRUPO PROPONENTE		GRUPO Oponente	
¿En qué condiciones puede ganar la apuesta el astronauta?		¿En qué condiciones puede ganar la apuesta el viajero espacial?	
			
Argumento (1) G. P	Moderador: “Se da la palabra al Grupo proponente recordando que tienen 3 minutos para exponer sus argumentos en defensa del astronauta, quién consideran ganará la apuesta en la situación hipotética planteada”: Argumento G.P: “Como nosotros podemos ver están los dos personajes, esta es la nave espacial, este es el personaje que se va a quedar quieto y este es el punto cero [...] como podemos ver, el astronauta que está quieto será el primero que llegue a la lámina, enfocándonos en que, en el mundo inercial, el movimiento que tiene la nave puede afectar el movimiento que tiene la onda... El láser perdón. ¿A que nos referimos con esto?, la velocidad y el movimiento que tiene la nave no tenemos claro si va a ser constante, puesto que si no se tiene un momentum claro puede tener distintas variabilidades. Con esto podemos ver que planteamos la situación de que	Moderador: “Conociendo los argumentos del grupo proponente se le dará la palabra al grupo oponente, recordando que tiene 3 minutos para exponer sus argumentos en defensa del viajero espacial, quién consideran ganará la apuesta en la situación hipotética planteada”: Argumento G.O: “Planteamos la situación en la que el láser del viajero espacial llegara antes que el del astronauta nos basamos en que primero los dos empiezan desde un punto cero, siendo que, aquí al lado de ellos está el observador y acá ellos. Y el astronauta desde esta misma distancia es que desprenderá la luz de su laser, pero el viajero especial, seguirá en su nave mientras tiene el láser prendido, por lo que este llegará antes, siendo que esta es la distancia de la luz en el momento en que el astronauta lo lleva, pero en ese tiempo que va la luz el viajero espacial ya con su nave a alcanzado más distancia,	Argumento (1) G.O

	viene en un constante movimiento en un tiempo, y luego se ralentiza la distancia y aumenta la velocidad, con esto vemos que la velocidad y el tiempo es constante con el otro compañero, podemos ver que el tiempo en el que llega es un poco más avanzado y este es el observador. En que nos estamos centrando nosotros principalmente es en la conservación del movimiento y en el movimiento inercial”. <i>Continúa</i> 	por lo que gracias a esa distancia y que el láser sigue prendido llegará antes”. Moderador: “Se da un espacio de 5 minutos para revisar las perspectivas de cada uno de los grupos, para empezar con la etapa de preguntas y de elaboración de nuevos argumentos en cada uno de los grupos”.  <i>Continúa</i>	
G.P: Preguntas al grupo contrario	Moderador: “Continuamos entonces en el debate, en esta oportunidad con la etapa de preguntas y de nuevos argumentos. Empezamos entonces con el grupo proponente. ¿Se hacen suscitado preguntas de acuerdo con los argumentos propuestos por el grupo oponente?” Participante A: “La única que me surge la duda es en qué nos estamos enfocando si en la inercial o la no inercial, sobre todo en el movimiento de la nave y de la luz [...], la inercialidad podemos ver que se altera la fuerza de cuerpos externos por decir, la velocidad cuando se acerca a la velocidad de la luz, se tiene la deformación o el estiramiento de cuerpos y la no inercial, podemos ver que se conserva sin importar que se supere la velocidad de la luz, la masa pues tal cual como es”. Participante B: “El cohete prendía el láser primero, lo que hacía que éste ganará, el problema acá es que es una competencia para salvar una de las vidas de las personas, por lo que al prender un láser primero se consideraría como trampa y no se podría llevar a cabo como una competencia justa. ¿Cuál es su	Moderador “Le damos la palabra al grupo oponente para dar respuesta a las preguntas del grupo contrario”: Respuesta al participante B (G.P), por parte del (G.O): “Lo que nosotros queremos decir en ese caso es que el astronauta fue en que demoró en prender, por lo que el viajero espacial lo prendió al tiempo justo, pero el astronauta se demoró más, por lo que el del viajero llega antes que el del astronauta, siendo el de la culpa el viajero y no el astronauta.” No hay respuesta al participante A (G.P), por parte del grupo.	G.O: Respuestas al grupo contrario

	argumento a favor de que éste sea el ganador? <i>Continúa</i> ➡	⬅ <i>Continúa</i>	
	Moderador: “¿El grupo oponente logró responder satisfactoriamente a sus inquietudes?” Participante B: “Si se logró responder, sino que, es que en la forma en cómo lo escribió se tomaba más que el viajero lo prendía primero antes que siquiera empezara, por eso se tomó de esa forma” Moderador: Hay una pregunta adicional al grupo oponente, damos la palabra al participante A (G.P): (pregunta adicional GO): Antes de hacer mi pregunta, quiero aclarar algo, y es que en por más de que haya sido la variabilidad que ustedes hayan puesto en su experimento mental en la exposición del problema nos pone que es justamente al mismo tiempo, entonces lo que a nosotros nos causa la duda, es cómo sucedería ese inicio adelantado, como se le podría decir. Ahora, mi pregunta exacta sería, si realmente el observador 2 no estuviese centrado en lo que pasó. ¿Como puede dar crédito de que el ganador fue el que iba en la nave espacial? <i>Continúa</i> ➡	Participante I: “Pues por lo que tuvimos en cuenta, el observador 2 como escribimos ahí no está del todo concentrado en los láseres, y podemos dar en cuenta otra parte de esto, es que pudo reconocer o decir rápidamente o ponerse justamente en la línea que estaban los dos laser en el tiempo correcto y logró coger uno de los dos antes de que éste llegara. ⬅ <i>Continúa</i>	
	Moderador: “¿El grupo oponente logró responder satisfactoriamente a sus inquietudes?” Participante A: “Me quedo un poco insatisfecho, pero sí”		

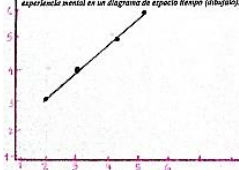
	<i>Continúa</i> 		
G.P: Respuesta al grupo contrario	Moderador: “Le damos la palabra al grupo proponente para dar respuesta a las preguntas del grupo contrario”: (GP): “Al momento en el que el cohete no sigue un movimiento rectilíneo uniforme, va a generar un movimiento por más mínimo que sea, va a generar un transcurso más largo en el recorrido del láser, puede que para quién vaya dentro de la nave el movimiento no haya sido perceptible o que realmente siga su recorrido inicial, que sucede con esto, por más de que sea un movimiento de un metro o muy mínimo, al momento en el recorrido se va a aumentar la distancia, lo que va afectar el resultado final del observador que está pendiente a la obtención de los rayos. <i>Continúa</i> 	Moderador: Dando continuidad con la etapa de preguntas, se da la palabra al grupo oponente: ¿Se hacen suscitado preguntas de acuerdo con los argumentos propuestos por el grupo oponente, en los cuales defienden que el astronauta ganará la apuesta?” Participante G: Les quería preguntar al otro equipo, que nos están diciendo por acá en la parte que ellos pusieron: “movimiento del cohete en el espacio altera el resultado final”. Les quiero preguntar, cómo está alterando esto, el movimiento del cohete como altera el resultado de que éste laser cambie de posición o siga la trayectoria inicial.  <i>Continúa</i>	G.O: Pregunta al grupo contrario
	Moderador: “Le damos la palabra al grupo proponente para dar respuesta a las preguntas del grupo contrario”: Participante A: “Al momento en que se altera la distancia que está recorriendo el objeto, en este caso la luz que se está refractando por el cohete, va a variar mucho la velocidad y la distancia que va a obtener el recorrido del láser como ya lo mencionamos anteriormente, si el cohete tiene un movimiento no recto, sino en una forma de semicírculo, la distancia que puede recorrer va a ser mayor en teoría a la que debería recorrer en el movimiento en recta. También debemos tener en cuenta que	Moderador: Hay una pregunta adicional al grupo proponente, damos la palabra al participante A (G.P): Participante J: “Mi pregunta es, ¿cómo afecta la relatividad de la onda al movimiento no rectilíneo del láser de un astronauta en comparación con el cohete en términos de velocidad?	

	puede haber variabilidades en el lugar en el que estemos, nos estamos enfocando en el vacío en el que va la línea completamente recta sin obstrucciones”. Moderador: “Si no hay más preguntas para ambos grupos, tendremos un pequeño receso de cinco minutos, en los cuales cada uno de los grupos pensará en efectivamente contemplar continuar con la posición del grupo, o si se adopta la posición del equipo contrario”. <i>Continúa</i> ↓	← <i>Continúa</i>	
Etapas de cierre (G.P)	Moderador: “Para el grupo proponente como el grupo proponente, ¿declaran continuar con su posición o adoptan la posición del equipo contrario?” El Grupo Proponente declara: “Nosotros tomamos la iniciativa de que el grupo de ellos tiene como así decirlo, una cierta razón, aunque los argumentos no fueron del todo acertados, la explicación del ejercicio nos dice que generalmente en el vacío siempre va a ver la misma velocidad en la luz, o sea, eso nunca va a cambiar. Y si el astronauta se acerca más a la lámina refractora, obviamente le va a llegar más rápido la refracción de la luz. Pero esto también desencadena diversos puntos como lo podrían ser los diversos marcos de referencia que los dos personas personajes los podrían tomar, pero en general nosotros vemos que el punto va para el viajero espacial”. Participante A: “Para complementar algo, y es que como nos lo están	Moderador: “Nosotros, seguimos con nuestra posición, ya que tendríamos una posibilidad del 50-50, que uno ganara por esta razón, y el otro ganara por la otra, o por el acercamiento y distancia, o también varía como el tiempo como dijeron en el otro equipo, que en el espacio la velocidad es la misma, pues que no va a cambiar, o que el otro se le desviara el láser, entre otras posibilidades”. Participante K: “También pensamos que el viajero espacial ganaría, pero es más una posibilidad 50-50, ya que, dependiendo el caso y en sí el espacio, los obstáculos que haya pueden cambiar mucho el resultado. En conclusión, ganaría el viajero espacial, pero, dependiendo el caso, un 50-50.	Etapas de cierre (G.O)

	proponiendo hay algo importante de aclarar y es que el astronauta quién está estático, tiene el rayo de luz directo, aunque la luz no se va a conservar solamente en esa dirección, la luz tiende a propagarse teniendo una pérdida mínima de la dirección del láser, la cual también va a tener pérdida la nave espacial, pero va a tener una pérdida disminuida por el movimiento constante”. <i>Continúa</i> ➡		
Pregunta de cierre moderador (G.P)	Moderador “Vamos a suponer entonces que, a lo largo del trayecto de la luz no hay ningún obstáculo, y que ambos rayos viajan libremente hacia la lámina. En este caso, para el grupo proponente y el grupo oponente. ¿Cuál sería el ganador?” (G.P): “Para nosotros sería un empate. Con el empate podemos ver que no hay variabilidad tanto en la refracción ni en ningún objeto o alguna fuerza que restrinja como el movimiento de la luz y junto a esto pues el movimiento de la nave, entonces consideramos que se conserva todo, generando igual la distancia y la velocidad de las luces que impactan al mismo tiempo. <i>Continúa</i> ➡	↙ <i>Continúa</i> Participante G: “También tendríamos la parte así de empate, como dijeron en el otro grupo estaría variando por varias cosas diferentes y otra cosa es que las dos personas lanzaron el láser al mismo tiempo, y si alguno de los dos se mueve aun así va a seguir con la misma distancia”. Participante H: “Lo que decían de la relatividad. La velocidad de la luz siempre tendrá la misma velocidad, entonces si no hay obstáculo alguno, sí o sí llegarán al mismo tiempo”	Pregunta de cierre moderador (G.O)

Guías de experimentación mental. Situación 1

Participante PB

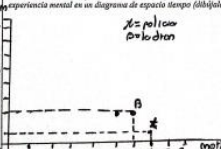
1. ¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en la experiencia mental?	2. ¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes a ser analizadas para dar respuesta a la pregunta planteada?
- Policía - infractor de tránsito - un transcurso	- velocidad - distancia - tiempo
3. ¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en la experiencia mental?	4. Describe un escenario en donde ocurrieron los hechos y narra tu experiencia mental.
- la persecución de un policía a un infractor de tránsito	- mi escenario sería una vía totalmente plana y tal vez unas cuantas sirenas de el vehículo del policía
5. ¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente la experiencia mental?	6. ¿Cuáles consideras que son las conclusiones de los cuales necesitas un mayor nivel de apropiación?
- creo que necesito las dos para hacer un análisis más profundo	- creo que necesitaria tipo una cámara o un tercero para que de su opinion
7. Ubica los eventos y líneas de universo que representen tu experiencia mental en un diagrama de espacio tiempo (diagrama)	8. De acuerdo con la experiencia imaginaria construida, ¿Cuáles son las conclusiones de tu experiencia mental que dan respuesta a los objetivos planteados?
	- mi conclusión es que teniendo en cuenta las cantidades físicas que se tuvieron presentes. Podría decirse que el policía pudo haber tenido la certeza de alcanzar al infractor de tránsito

de segundo que asaba triple así sucesiva con cada número

Participante PD

Experimento mental número 1

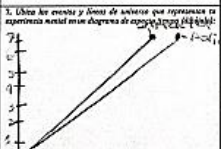
A continuación, se presentan los pasos para desarrollar un experimento mental. Tómate tu tiempo para pensar la situación hipotética planteada en la tabla 1, luego responde cada ítem en el espacio de cada recuadro.

1. ¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en la experiencia mental?	2. ¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes a ser analizadas para dar respuesta a la pregunta planteada?
con vendedores de autos ve que un ladrón le roba a uno de sus clientes y la policía lo va a buscar de ese ladrón y la mejor ve que lo detiene en una esquina	de tiempo ya que se duró por el tiempo de persecución del policía y la vendedores
3. ¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en tu experiencia mental?	4. Describe un escenario en donde ocurrieron los hechos y narra tu experiencia mental.
el cuento con mayor relevancia es el robo de la pertenencia o lo que tenga la señora	el escenario ocurre en un barrio un poco peligroso pero con algunos ladrones el ladrón pudo tener una pequeña parte para poder escapar pero fue atrapado por el policía como cuando empujados. Acabó en estado de 16 m en dos segundos o minuto y el policía dis = fm en 1 segundo o minuto
5. ¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente tu experiencia mental?	6. ¿Cuáles consideras que son las conclusiones de los cuales necesitas un mayor nivel de apropiación?
que tiene que depender de tipo de su rapidez o velocidad de un objeto robado, o debe tener en cuenta la capacidad del objeto	Los puntos que necesitan un mayor nivel de apropiación es sobre la parte del tipo de tiempo que se demore en alcanzar su objetivo
7. Ubica los eventos y líneas de universo que representen tu experiencia mental en un diagrama de espacio tiempo (diagrama)	8. De acuerdo con la experiencia imaginaria construida, ¿Cuáles son las conclusiones de tu experiencia mental que dan respuesta a los objetivos planteados?
	Conclusiones es que la distancia y el tiempo que se da es a punto de los recorridos hacia adelante de su posición si este a 60 f metros y el intervalo de tiempo

Participante PC

Experimento mental número 1

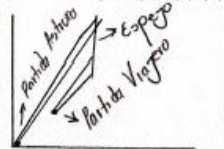
A continuación, se presentan los pasos para desarrollar un experimento mental. Tómate tu tiempo para pensar la situación hipotética planteada en la tabla 1, luego responde cada ítem en el espacio de cada recuadro.

1. ¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en la experiencia mental?	2. ¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes a ser analizadas para dar respuesta a la pregunta planteada?
Policia, Transcurso y infractor	Velocidad de la luz
3. ¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en la experiencia mental?	4. Describe un escenario en donde ocurrieron los hechos y narra tu experiencia mental.
El escape del infractor su salto a la velocidad de la luz. Que el policía lo robe	Al alcanza la velocidad de la luz el infractor solo se convierte en un aspecto de luz y el policía lo roba robando convirtiéndose en el "vicio mismo" robando a sí mismo
5. ¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente la experiencia mental?	6. ¿Cuáles consideras que son las conclusiones de los cuales necesitas un mayor nivel de apropiación?
La materia no se destruye su tiempo na.	Entre el velocidad y la luz/velocidad de la luz
7. Ubica los eventos y líneas de universo que representen tu experiencia mental en un diagrama de espacio tiempo (diagrama)	8. De acuerdo con la experiencia imaginaria construida, ¿Cuáles son las conclusiones de tu experiencia mental que dan respuesta a los objetivos planteados?
	La situación en la que puede darse esto es imposible.

Guías de experimentación mental. Situación 2

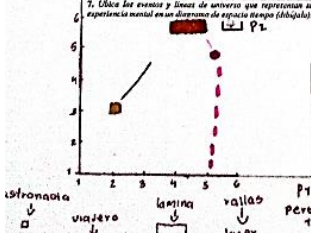
Participante PA

A continuación, se presentan los pasos para desarrollar un experimento mental. Tómase tu tiempo para pensar la situación hipotética planteada en la tabla 1, luego responde cada ítem en el espacio de cada recuadro.

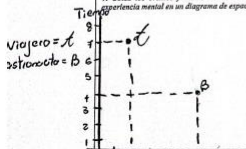
1. ¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en tu experiencia mental?	2. ¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes a ser analizadas para dar respuesta a la pregunta planteada?
Los Objetos Son: Nave, Tanque Quemador de luz, lámina reflectora	Tiempo, distancia, velocidad, refracción de luz, aceleración, temperatura
3. ¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en tu experiencia mental?	4. Describe un escenario en donde ocurran los hechos y narra tu experiencia mental.
El Viajero que se mueve para llegar a la lámina y el astronauta estático	El Viajero logra recibir la luz, por que desde el plano de referencia de él se vio diferente
5. ¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente tu experiencia mental?	6. ¿Cuáles consideras que son las consecuencias de los hechos sucesos en mayor nivel de apropiación?
La Teoría de Intervalo y la de la relatividad Fundamentan	de los marcos de referencia y la relatividad general
7. Ubica los eventos y líneas de universo que representen tu experiencia mental en un diagrama de espacio tiempo (adjúntalo).	8. De acuerdo con la experiencia imaginaria construida, ¿Cuáles son las conclusiones de tu experimento mental que dan respuesta a las preguntas planteadas?
	da respuesta a quien ganaría de donde un postulado

Participante PB

A continuación, se presentan los pasos para desarrollar un experimento mental. Tómase tu tiempo para pensar la situación hipotética planteada en la tabla 1, luego responde cada ítem en el espacio de cada recuadro.

1. ¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en tu experiencia mental?	2. ¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes a ser analizadas para dar respuesta a la pregunta planteada?
Astronauta, el astronauta Janay, el tanque de combustible, el medio donde y como colocará la luz	tiempo, distancia, temperatura
3. ¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en tu experiencia mental?	4. Describe un escenario en donde ocurran los hechos y narra tu experiencia mental.
Se vea la situación de ver su movimiento, como plantean el plano o como hacen para Janay	veo que se va a ir desde una cámara o algo que me proteja la situación, me parece muy buena la nave en la que lo tiene. Puede llegar a manejar cosas increíbles
5. ¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente tu experiencia mental?	6. ¿Cuáles consideras que son las consecuencias de los hechos sucesos en mayor nivel de apropiación?
Creo que los 2 ya que para el caso las leyes físicas serían iguales y la velocidad de la luz sería para los observadores o seres	veo con claridad que el medio físico
7. Ubica los eventos y líneas de universo que representen tu experiencia mental en un diagrama de espacio tiempo (adjúntalo).	8. De acuerdo con la experiencia imaginaria construida, ¿Cuáles son las conclusiones de tu experimento mental que dan respuesta a las preguntas planteadas?
	mi conclusión según mi experiencia sería el hecho de que el viajero fue de Janay por su corta distancia pero no sé si el astronauta puede Janay

Participante PC

1. ¿Cuáles son los objetos, instrumentos o personas involucradas en tu experiencia mental?	2. ¿Cuáles son las cantidades físicas (tiempo, temperatura, distancia, entre otras) que consideras relevantes a ser analizadas para dar respuesta a la pregunta planteada?
condición 1 viajero y el rayo de luz, condición 2 viajero y su distancia en el momento que se trata la luz, condición 3 astronauta = el rayo de luz y la condición que el viajero como tiempo y distancia	condición 1: tiempo del viajero en el que manda el rayo de luz o distancia, condición 2: segundos de 60 m, condición 3: tiempo de su tiempo y de donde el rayo: 1 segundo después de 60 m
3. ¿Cuáles son los eventos de mayor relevancia en tu experiencia mental?	4. Describe un escenario en donde ocurran los hechos y narra tu experiencia mental.
El evento más relevante es del hecho que por lo puesto por el tiempo 1. porque nos muestra quien gana 3. cuando los rayos están a la mitad del camino	el escenario donde estar pasando los hechos es en el espacio y mi experiencia es como tratar de responder o preguntar que o quien gana la cuestión comparando tiempo, distancia de la luz
5. ¿Cuáles son las leyes o principios que fundamentan teóricamente tu experiencia mental?	6. ¿Cuáles consideras que son las consecuencias de los hechos sucesos en mayor nivel de apropiación?
La más importante es la ley de la relatividad, porque se aplica para todos los observadores y tienen un estado relativo y con un movimiento recto	en el que necesito un mejor nivel de apropiación es en la parte de la ley tener algo concreto
7. Ubica los eventos y líneas de universo que representen tu experiencia mental en un diagrama de espacio tiempo (adjúntalo).	8. De acuerdo con la experiencia imaginaria construida, ¿Cuáles son las conclusiones de tu experimento mental que dan respuesta a las preguntas planteadas?
	La conclusión de mi experimento mental es que depende de la velocidad que tengan los dos tiempo etc o podríamos decir uno gana por su rapidez o el otro porque el rayo llega más rápido