

ANÁLISIS DE CAMPOS DÉBILES EN LA PREDICCIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES

Franyelit Suárez-Carreño^{1*} 

¹Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Aplicadas, Carrera de Ingeniería Industrial, Quito-Ecuador, E-mail: franyelit.suarez@udla.edu.ec

*Autor para la correspondencia: franyelit.suarez@udla.edu.ec

Recibido: 31-01-2022 / Aceptado: 30-03-2022 / Publicación: 01-05-2022

Editor Académico: David Anzules Intriago 

RESUMEN

La interacción gravitacional puede ser entendida a partir de la teoría de la Relatividad General, presentada en 1915, donde se exponen las diferencias entre la aceleración y la gravedad, presentes en una misma realidad, y además, se describen las características del espacio-tiempo y los fundamentos de covariancia. En este documento se muestra un análisis metodológico basado en el método PRISMA de revisión bibliográfica, sobre los límites de campos débiles y su relación con las ondas gravitacionales. Se analizan los aportes que surgieron en 1950-1960 de los científicos Bondi, Sachs, Penrose, entre otros. Finalmente, los resultados muestran las características esenciales de las ondas gravitatorias, además de las similitudes presentes con las ondas electromagnéticas. Entre las conclusiones más relevantes están que Las ondas gravitacionales se propagan como ondas a la velocidad de la luz, ellas constituyen cambios que se generan en la curvatura del espacio-tiempo.

Palabras clave: relatividad general, ondas gravitacionales, ondas electromagnéticas.

WEAK FIELD ANALYSIS IN GRAVITATIONAL WAVE PREDICTION

ABSTRACT

The gravitational interaction can be understood from the theory of General Relativity, presented in 1915, where the differences between acceleration and gravity, present in the same reality, are shown, and in addition, the characteristics of space-time and the fundamentals of covariance are described. This document shows a methodological analysis based on the PRISMA method of literature review, on the limits of weak fields and their relationship with gravitational waves. The contributions that emerged in 1950-1960 from scientists Bondi, Sachs, Penrose, among others, are analyzed. Finally, the results show the essential characteristics of gravitational waves, in addition to the similarities present with electromagnetic waves. Among the most relevant conclusions are that gravitational waves propagate as waves at the speed of light, they constitute changes that are generated in the curvature of space-time.

Keywords: general relativity, gravitational waves, electromagnetic waves.

ANÁLISE DE CAMPO FRACO NA PREVISÃO DE ONDAS GRAVITACIONAIS

RESUMO

A interação gravitacional pode ser compreendida a partir da teoria da Relatividade Geral, apresentada em 1915, onde são expostas as diferenças entre aceleração e gravidade, presentes em uma mesma realidade e, ainda, as características do espaço-tempo e os fundamentos da covariância. Este documento apresenta uma análise metodológica baseada no método PRISMA de revisão de literatura sobre os limites dos campos fracos e sua relação com as ondas gravitacionais. São analisadas as contribuições surgidas em 1950-1960 dos cientistas Bondi, Sachs, Penrose, entre outros. Por fim, os resultados mostram as características essenciais das ondas gravitacionais, além das semelhanças presentes com as ondas eletromagnéticas. Entre as conclusões mais relevantes estão que as ondas gravitacionais se propagam como ondas na velocidade da luz, elas constituem mudanças que são geradas na curvatura do espaço-tempo.

Palavras chave: relatividade geral, ondas gravitacionais, ondas eletromagnéticas.

Citación sugerida: Suárez-Carreño, F. (2022). Análisis de campos débiles en la predicción de ondas gravitacionales. Revista Bases de la Ciencia, 7(2), 33-47. DOI: <https://doi.org/10.33936/revbasdelaciencia.v7i2.4361>



1. INTRODUCCIÓN

La teoría de la relatividad general trajo consigo algunos debates científicos que condujeron a nuevas posturas entorno a ciertas teorías previas, como el caso de la mecánica newtoniana, que suponía que el espacio y el tiempo eran magnitudes universales y que eran absolutas, lo cual no resultaba coherente con las nuevas propuestas de la teoría de la relatividad especial, cuyo principio expone que cada observador tiene un marco de referencia distinto y un tiempo diferente, según la velocidad del mismo (Mielnik, 1988), (Abbott B, 2016), (Abbott B. , 2016). Además, la ecuación gravitatoria de Poisson, asegura que la densidad de masa, depende de la masa y del espacio, por ende, también se vio afectada con la teoría de la relatividad especial, ya que la densidad de masa no es un parámetro constante, sino que varía según la velocidad del observador (Alemañ, 2011).

Las ecuaciones de la covariancia propuestas por Hilbert (Hilbert, 1893), (Antoniuk, 2021), postulan que la presencia de masa y energía causan deformaciones en el espacio-tiempo, y estos cambios afectan la trayectoria de los cuerpos e incluso la trayectoria de la luz. Estas posturas dieron origen a la teoría de la relatividad general, que se describe a través de las ecuaciones de campo de Einstein y que muestran cómo la densidad local de materia y energía, son determinantes para las características físicas del espacio-tiempo.

En los años 70 se hicieron algunos aportes científicos sobre la geometría de los agujeros negros, previstos por Einstein años atrás (Barradas, 2007), (Bambi, Jiang & Steiner, 2016). En el año 2001 el Telescopio Espacial Hubble y el Observatorio Chandra de Rayos X, encontraron de forma individual, la presencia de un horizonte de sucesos, considerada la principal característica de un agujero negro. El horizonte de eventos es la región sin retorno de un agujero negro, donde nada, ni siquiera la luz puede escapar (NASA Ciencia, 2001), (Armano, 2016), (Doeleman, 2008).

El horizonte de eventos es una frontera que separa al agujero negro del resto del universo, provocado por la singularidad de la curvatura del espacio-tiempo. Esto no debe confundirse con los agujeros de gusanos, que, en teoría, es un camino entre dos agujeros negros, que conducen a dos partes distintas del universo (OKDIARIO, 2017), (Hong, Tao & Zhang, 2021), (Aydogdu & Salti, 2022).

Las ondas gravitacionales son el resultado de la Teoría de la Relatividad General propuesta por Albert Einstein, según la cual el espacio se deforma o es maleable, debido a la cantidad de materia y energía. Cuerpos masivos acelerados, generan oscilaciones en el espacio tiempo, que no son más que las ondas gravitacionales (Abbott B., 2016), (Barradas, 2007).

La Ley de Newton de Gravitación Universal, lleva implícita una característica de acción a distancia, en la que se indica que toda interacción se propaga de forma inmediata a todo el espacio. De ahí que

la ecuación que relaciona la fuerza F ejercida por una masa m_1 sobre una masa m_2 , puede describirse con la ecuación (1), donde G es la constante de gravitación universal.

$$\vec{F} = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \quad (1)$$

La ecuación (1) establece que la fuerza ejercida por una masa m_1 sobre otra masa m_2 depende de la distancia que las separa. Este enunciado es muy parecido a la Ley de Coulomb, pero en esta última la fuerza podía ser atractiva o repulsiva según las características de la carga, sin embargo, en la Ley de Gravitación Universal, la masa viene en un solo tipo, lo que hace que la fuerza siempre sea atractiva (García, Morones & Toledo, 2006), (Barreto, et al., 2005).

Al igual que la Ley de Coulomb, la ecuación (1) es solamente válida para el caso estático. De otra manera, la propagación sería inmediata, lo que no sería coherente con la ley de relatividad especial, donde se indica que ninguna señal se puede propagar con velocidades por encima de la velocidad de la luz.

La teoría general de la relatividad, descrita por Einstein en 1915 (Barradas, 2007), (Ghez, Salim & Weinberg, 2008), es conocida también como la teoría relativista de gravitación, y está asociada a las ecuaciones de campo de Einstein (3), que describe la dinámica del campo gravitacional y que son una generalización de la ecuación Poisson (2).

$$\nabla^2 V(\vec{r}) = 4\pi\rho(\vec{r}) \quad (2)$$

Donde $\rho(\vec{r})$ es la materia descrita por densidad de masa.

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = 8\pi GT_{\mu\nu} \quad (3)$$

Donde $G_{\mu\nu}$ es el tensor de Einstein, $R_{\mu\nu}$ es el tensor de Ricci, $Rg_{\mu\nu}$ es la curvatura escalar, $g_{\mu\nu}$ es el tensor métrico y $T_{\mu\nu}$ es el tensor energía-momento del campo gravitacional.

La teoría de la relatividad general nace de la inconformidad de Einstein por unir la teoría de la relatividad especial con la teoría de la gravitación universal propuesta por Newton (Alemañ, 2011). De ahí que surgiese la necesidad de establecer criterios y patrones para unir ambas teorías en un punto de congruencias, y que, se pudiese hacer para sistemas de referencias generalizados.

En este trabajo se realiza un análisis bibliográfico de la teoría de la relatividad general y se evalúan los parámetros físico-matemáticos involucrados. Además, se considera su relevancia para los campos débiles en las ondas gravitacionales. Se evalúan diversos materiales académicos de una variedad de

fuentes y se toman en cuenta los criterios que hicieron posible el descubrimiento de las ondas gravitacionales y su impacto en las teorías físicas.

1.1. Principios y leyes físicas de la Teoría de la Relatividad General

La teoría de la relatividad general, está estructurada por los elementos que se describen en la **figura 1**.

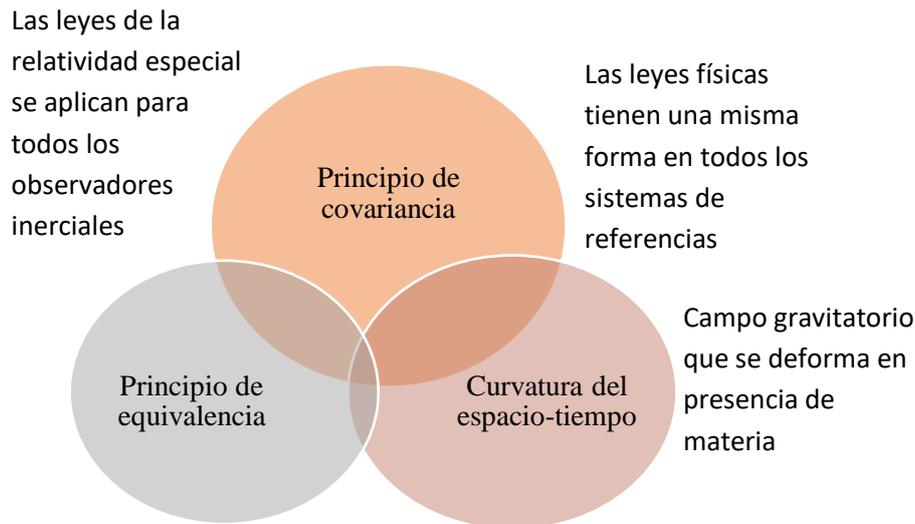


Figura 1. Características de la teoría de la relatividad general.

Fuente: Elaboración propia

El principio de covariancia considera que las ecuaciones y las leyes físicas se mantienen iguales en todos los sistemas de referencia, y que son las mismas para todos los observadores, lo que puede decirse que todos los sistemas de referencias son equivalentes (Gallegos & Matos, 2021), (Mittra, Corda & Mosquera-Cuesta, 2021).

Por otro lado, el principio de equivalencia, considera que la fuerza de la gravedad no es causada por alguna fuerza, sino que son ocasionadas por la curvatura del espacio-tiempo. De ahí que un cuerpo en caída libre se considera un sistema inercial, para la teoría de equivalencia y un sistema no inercial para la teoría newtoniana (Kumar, Harikumar, Tajron, Meljanac, & Samsarov, 2015).

En relación a la curvatura del espacio-tiempo, se refiere a que ante la presencia de materia, el espacio-tiempo, sufre una alteración geométrica y se deforma. Esto hace referencia a la desviación de un haz de luz ante la presencia de un cuerpo masivo (Okyay & Ovgun, 2022), (Sorge, 2021).

1.1.1. Teoría Electromagnética

La teoría electromagnética puede simplificarse con las Ecuaciones de Maxwell (Fernández), que comprende cuatro ecuaciones básicas que caracterizan la teoría electromagnética. Dicha teoría nace en 1861 y se extiende hasta 1865 cuando se establecen y definen los postulados que simplifican los fenómenos del electromagnetismo.

Las teorías relacionadas al campo eléctrico, al campo magnético y a las corrientes sobre conductores, estaban ya establecidas, pero de forma aislada, formuladas por los científicos Ampere, Faraday y Lenz (Yunes & Siemens, 2013), (Toniato, 2019). Sin embargo, no existía una teoría que uniera todas estas ideas en una sola, y de ahí que Maxwell, tomando en cuenta los estudios previos, unificara todas las leyes en lo que llamó campo electromagnético.

Maxwell analizó la conservación de la carga eléctrica y se dio cuenta que existía una variable adicional, a la que llamó corriente de desplazamiento (Alvarado, 2020), (Srivastava & Shankaranarayanan, 2022). Además, identificó en la ley de Ampere, la presencia de ondas electromagnéticas desplazándose, por lo tanto, reconoció a la luz como una onda electromagnética. Las ecuaciones entonces se simplifican según:

1. Ley de Gauss para el campo eléctrico

La Ley de Gauss fue propuesta por Carl Friedrich Gauss (1777-1855), y representa una similitud cercana con La Ley de Coulomb (Alvarado, 2020). La ecuación (1) describe la relación del flujo del campo eléctrico de una superficie cerrada y con una carga eléctrica encerrada en su interior.

$$\Phi E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (4)$$

En (1) se observa que el flujo del campo eléctrico, a través de una superficie cerrada, es igual a la sumatoria de las cargas dentro de dicha superficie y la permitividad eléctrica en el vacío, esto es descrito en (2).

$$\Phi E = \oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum q}{\epsilon_0} \quad (5)$$

2. Ley de Gauss para campo electromagnético

También conocida como Ley de Faraday-Lenz (Rojas, 2015), se refiere a la fuerza electromotriz en un campo magnético. Considera el hecho, que en un campo magnético variable en el tiempo, existe una fuerza electromotriz inducida, presente en todo circuito eléctrico (ecuación (6)).

$$\oint_C \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_S \frac{d\vec{B}}{dt} \cdot d\vec{S} \quad (6)$$

El símbolo negativo implica que, la corriente inducida lleva un sentido contrario a la causa que la produce. Se observa que, en un campo magnético, variable en el tiempo, existe un campo eléctrico en un camino cerrado. Y existe un campo eléctrico, ya que existe una fuerza electromotriz (Will, 2004), (Ryzhak & Synyukhina, 2022).

3. Ley de Ampere modificada

Ampere propuso la ley que relaciona un campo magnético estático con una corriente invariable en el tiempo, esto quiere decir que la densidad de corriente en una curva cerrada, es producto de un campo magnético en dicha curva (Vincent, Paumard, Gourgoulhon, & Perrin, 2011). Esta formulación no resultaba válida para campos dependientes del tiempo, y al intentarlo se irrumpía la ley de conservación de la carga, sin embargo, Maxwell corrigió esta formulación y logró establecer la ecuación (4) que fue comprobada posteriormente por Heinrich Rudolf Hertz.

$$\oint_C \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} \cdot d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S} \quad (7)$$

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Este trabajo fue desarrollado utilizando una metodología bibliográfica, tomando en cuenta una cadena de búsqueda exhaustiva centrada en el tema de estudio, con palabras clave acordes y específicas para reducir resultados. El compendio de material académico estuvo compuesto por 353 artículos, que luego fueron depurados para focalizarlos a los estrictamente necesarios para el tema de este trabajo. Se tomaron en cuenta los criterios de exclusión de casos de estudio, y de los criterios de inclusión de formulaciones teóricas, bases científicas y material académico de fuentes confiables.

El proceso metodológico estuvo compuesto por los elementos de la **figura 2**. Obsérvese que son cuatro fases esenciales que van desde la definición del tema hasta el procesamiento de la información y caracterización.



Figura 2. Proceso metodológico.

Fuente: elaboración propia.

1. **Definición y delimitación del problema:** con el fin de establecer los objetivos y el alcance de la investigación, para lo cual se evalúan los criterios existentes en el área de estudio, la finalidad de esta fase radica en:
 - a. Conocer las nuevas propuestas en el área de investigación, para así evaluar y analizar los aspectos teóricos involucrados.
 - b. Reconocer las teorías físicas como elementos fundamentales de la ciencia.
 - c. Analizar los aportes científicos en torno a las ondas gravitacionales y los avances en el área.
2. **Clasificación de material científico y académico:** una vez revisados los aportes científicos, tomando en cuenta la cadena de búsquedas, se encontraron una diversidad de documentos que debieron ser seleccionados de acuerdo a los criterios de inclusión y tomando en cuenta la contribución científica para este trabajo.
3. **Revisión de resumen, metodología y resultados:** se evaluó cada material seleccionado tomando en cuenta los aspectos más relevantes de cada uno, principalmente en cuanto a las metodologías y resultados encontrados.
4. **Procesamiento de la información:** Se procesó la información con el fin de tomar en cuenta solo aquellos documentos que ofrecían aportes significativos, y que además estuvieran dentro de los criterios necesarios para la elaboración de este documento

Los criterios de inclusión fueron:

- Trabajos publicados en revistas indexadas de acceso abierto, intentando que en su mayoría fueran de base Scopus, pero también otras como Springer, IEEE, Latindex, Scielo, otras.
- Trabajos de física con alcance teórico.

Se utilizó una cadena de búsquedas con las palabras clave “weak AND field AND gravitational AND field AND gravitational AND wave”, que arrojó un total de 782 resultados en Scopus (**figura 3**), siendo necesaria una depuración de la cadena, ya que dentro de esta primera selección se mostraban artículos que no eran específicos del tema.

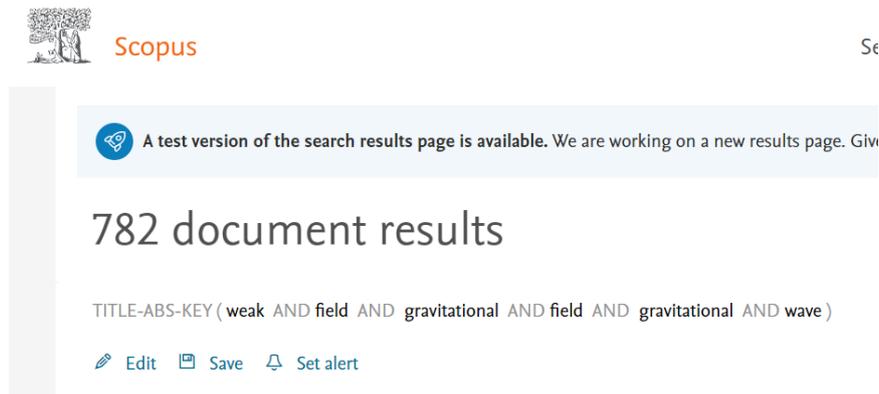


Figura 3. Revisión con la primera cadena de búsqueda (weak AND field AND gravitational AND field AND gravitational AND wave).

La cadena final de búsqueda fue weak field and gravitational wave and physical, que arrojó un total de 194 documentos (**Figura 4**) asociados al tema específico de estudio (**Tabla 1**).

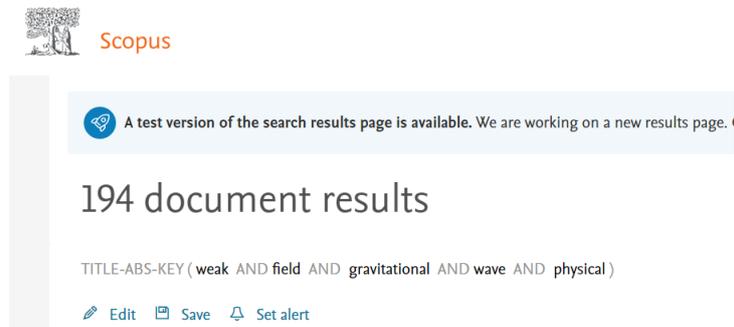


Figura 4. Segunda cadena de reducción de contenido en Scopus.
Fuente: (Biblioteca UDLA, 2022)

Tabla 1. Bases de datos revisadas

Base de datos	Cadena de búsqueda	Número de documentos
Scopus	weak AND field AND gravitational AND field AND gravitational AND wave	782
	weak field AND gravitational wave AND physical	194
Springer	weak field AND gravitational wave AND physical	147
IEEE	weak field AND gravitational wave AND physical	12

La metodología PRISMA utilizada para la selección de información se muestra en la **figura 6**.

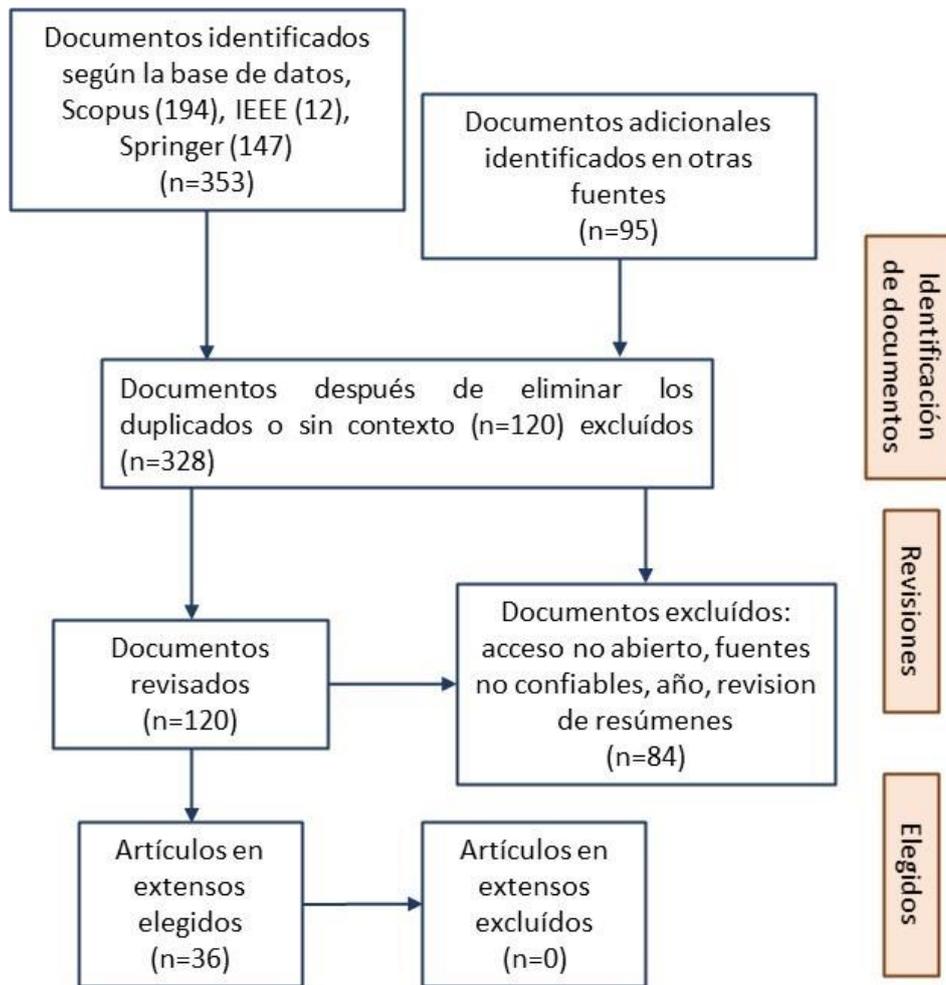


Figura 6. Metodología PRISMA empleada.

Fuente: Propia

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Resultados

Una vez realizado el análisis bibliográfico es posible destacar los siguientes resultados:

1. La radiación gravitacional ($g_{\mu\nu}$) es estudiada a partir de la métrica de la perturbación de espacio-tiempo plano ($n_{\mu\nu}$) y en la aproximación de campos débiles (Nieva, 2014), (Suárez & Rosales, 2019), descrito en la ecuación (5).

$$g_{\mu\nu} = n_{\mu\nu} + \epsilon h_{\mu\nu} \quad (8)$$

La perturbación a un espacio-tiempo de Minkowski está dado por $h_{\mu\nu}$. La relevancia del espacio-tiempo de Minkowski radica en las tres dimensiones ordinarias del espacio y una dimensión de tiempo adicional.

2. Las ecuaciones de campo pueden ser expresadas a partir de una ecuación de onda (Rosales, Jarrouj, & Serrano, 2007), dado que el tensor Riemann está dado por una ecuación de onda (6).

$$\square R_{\mu\nu\lambda\sigma} = 0 \quad (9)$$

3. Las fluctuaciones en el campo gravitatorio no ocurren de manera simultánea en diferentes escenarios, sino que se propagan como las ondas electromagnéticas en el vacío, esto significa que se propagan a la velocidad de la luz, lo que da lugar a las ondas gravitacionales.
4. El autor (Nieva, 2014) logró demostrar que la curvatura, conocida como tensor de Riemann, se puede dividir en dos partes; la primera es la que depende de la curvatura de Ricci y la otra está dada por el tensor de Weyl, donde se anulan las contracciones del tensor de Riemann.

$$R_{abcd} = C_{abcd} + (g_{a[cRd]b} - g_{b[cRd]a}) - \frac{1}{3}Rg_{a[cg_d]b} \quad (10)$$

R_{abcd} es el tensor de Riemann, C_{abcd} son los símbolos de Krissstoffel.

g_{ab} son las componentes del tensor métrico. Pero se puede descomponer esa métrica como $g_{ab} = \eta_{ab} + \varepsilon_{ab}$ dónde η_{ab} es la métrica plana de Minkowski, ε_{ab} mide el tamaño de la perturbación y h_{ab} es la parte de la métrica que perturba la métrica de Minkowski. O sea, las ecuaciones de campo de Einstein linealizadas se asemejan cuando se toca débilmente una campana.

5. Para comprender la aproximación para campos gravitatorios débiles, es necesario comparar el lagrangiana clásico con el lagrangiana relativista, tomando en cuenta pequeñas velocidades. Obteniendo las ecuaciones del movimiento de una partícula en un campo gravitatorio débil, descritas en (8) y (9).

$$\dot{r} = -\dot{t}^2 \nabla \phi_g \cong -\nabla \phi_g \quad (11)$$

$$\ddot{t} + \frac{2\dot{t}}{c^2 + 2\phi_g} \dot{r} \cdot \nabla \phi_g = 0 \quad (12)$$

Donde $\dot{t}^2 \nabla \phi_g$ es el factor de ralentización temporal.

6. Las ecuaciones descritas por (Álvarez, Álvarez, & Moya, 2017) muestran que existe una relación de similitud entre la teoría electromagnética de Maxwell y la teoría de campos gravitatorios.
7. La tabla 2 muestra los aportes académicos y de investigación generales, según las fuentes consultadas. Se observa que las principales revistas donde se publican resultados de investigación en temas de Física son Scopus, y las revistas de menor impacto tienen pocos trabajos del tema. Se pudo constatar que los resultados más significativos también pertenecen a fuentes Scopus, y que las demás fuentes tienen resultados menos relevantes. A diferencia

de otras áreas profesionales donde los resultados pueden ser más equilibrados en diferentes fuentes.

Tabla 2. Principales aportes encontrados en las fuentes consultadas

Base de datos	Aportes Científicos
Scopus	Efectos de campos gravitatorios en agujeros negros.
	Campos débiles en la simulación de ondas gravitacionales
	Aproximación de campos débiles
	Efectos cuánticos gravitacionales
Springer	Principios y leyes físicas
	Física de partículas y campos gravitatorios
	Relatividad general
	Modos cuasinormales escalares
IEEE	Características del espacio-tiempo
	Principios y leyes físicas
	Límite de masa para agujeros negros
	Modelo de datos de agujeros negros
Otras fuentes	Principios y leyes físicas
	Campos débiles y espacio-tiempo
	Agujeros negros y sus características
	Principios y leyes físicas

3.2. Discusión

El análisis de los sistemas binarios de estrellas de neutrones, permitió la comprensión de las ondas gravitacionales, previo a su detección directa.

En la frontera donde el campo gravitatorio es débil y las partículas presentan movimientos casi nulos, deberían acoplarse las teorías de la relatividad con la teoría de la gravitación universal, ya que la primera surge como una mejora de la segunda.

Las ondas electromagnéticas están formadas por un conjunto de electrones que se desplazan de forma compleja desde la fuente, además de un conjunto de fotones que son emitidos. Por otro lado, las ondas gravitatorias, llevan información que tiene una conexión entre la fuente y el movimiento que las produce.

Las ondas electromagnéticas pueden tener múltiples polarizaciones, mientras que las ondas gravitatorias solo pueden tener polarización plus y polarización cruzada, con un ángulo entre ellas de $\frac{\pi}{4}$. Sin embargo, es muy difícil la detección directa de ondas gravitatorias, por su pequeña amplitud y efectos de difícil observación.

4. CONCLUSIONES

Las ondas gravitacionales se propagan como ondas a la velocidad de la luz, ellas constituyen cambios que se generan en la curvatura del espacio-tiempo. Cuando los objetos o conjuntos de objetos interactúan entre sí, se emite una radiación gravitatoria.

Las detecciones de ondas gravitatorias permitirían conocer la dinámica de los agujeros negros, que poseen una enorme cantidad de masa en un volumen pequeño, lo cual resulta único y no es posible apreciarlo en ningún otro elemento del universo.

Los cuerpos que pueden producir ondas gravitatorias detectables son objetos masivos con altas velocidades y que tienen fuertes aceleraciones. Por ende, entre los eventos conocidos que podrían producir la detección de ondas gravitacionales, estarían la formación de agujeros negros.

5. DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS DE LOS AUTORES

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

6. REFERENCIAS

- Abbott, B. (2016). Observation of Gravitational Waves from a 22-Solar-Mass Binary Black Hole Coalescence. *Phys. Rev.*, 1-14.
- Abbott, B. (2016). Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger. *Phys. Rev.*, 1-16.
- Alemañ, R. (2011). Relatividad general y teoría cuántica no relativista. *Lat. Am. J. Phys. Educ.* , 5(1), 62-72.
- Alvarado, D. (junio de 2020). Ecuaciones de Maxwell. Recuperado el enero de 2022, de https://www.researchgate.net/profile/Diego-Alvarado-Silos/publication/342153868_Ecuaciones_de_Maxwell/links/5ee5228892851ce9e7e37733/Ecuaciones-de-Maxwell.pdf
- Álvarez, W., Álvarez, B., & Moya, D. (2017). LINEALIZACIÓN DE LAS ECUACIONES DE CAMPO DE EINSTEIN. *Matemática*, 1-8.
- Antoniuk, P. (2021). A new approach to the derivation of the law of universal gravitation from Kepler's laws. *Journal of Physics: Conference Series*, 012012. doi:10.1088/1742-6596/2081/1/012012
- Armano, M. (2016). Sub-Femto-g Free Fall for Space-Based Gravitational Wave Observatories: LISA Pathfinder Results. *Phys. Rev.* , 1-10.
- Aydogdu, O., & S. M. (2022). Evolution of axial gravitational waves in rainbow universe. *Physics Letters, Section B: Nuclear, Elementary Particle and High-Energy Physics*, 136999. doi:10.1016/j.physletb.2022.136999
- Bambi, B., Jiang, J., & Steiner, J. (2016). Testing the no-hair theorem with the continuum-fitting and the iron line methods: a short review. *Class. Quant. Grav.*, 1-19.
- Barradas, J. (2007). ¿Qué son los agujeros negros? Artículos de divulgación.

- Barreto, W., Da Silva, A., Gomez, R., Lehner, L., Rosales, L., & Winicour, J. (2005). The system Einstein-Klein-Gordon 3D in characteristic general relativity . *Phys. Rev.* .
- Doeleman, S. (2008). Event-horizon-scale structure in the supermassive black hole candidate at the Galactic Center. *Nature*, 78-80.
- Fernández, H. (s.f.). Ecuaciones de Maxwell. Recuperado el 07 de enero de 2022, de http://sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2014-08-10_01-08-36108492.pdf
- Gallegos, O., & Matos, T. (2021). Weak gravitational quantum effects in boson particles. *General Relativity and Gravitation*, 50. doi:10.1007/s10714-021-02810-6
- García, H., Morones, J.-R., & Toledo, L. (2006). Ondas gravitacionales; un nuevo contacto de la física con la tecnología. *Ingenierías*, IX(31), 24-39.
- Ghez, A., Salim, S., & Weinberg, N. (2008). Measuring Distance and Properties of the Milky Way's Central Supermassive Black Hole with Stellar Orbits. . *Astrophys. J.* , 1044-1062.
- Hilbert, D. (1893). Ueber die vollen Invariantensysteme. *Anales matemáticos*, 42(3), 313-373.
- Hong, W., Tao, J., & Zhang, T. (2021). Method of distinguishing between black holes and wormholes. *Physical Review D*, 104(1215).
- Kumar, S., Harikumar, E., Tajron, J., Meljanac, S., & Samsarov, A. (2015). Noncommutative scalar quasinormal modes and quantization of entropy of a BTZ black hole. Springer, 20224. doi:[https://doi-org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/10.1007/JHEP09\(2015\)025](https://doi-org.bibliotecavirtual.udla.edu.ec/10.1007/JHEP09(2015)025)
- Mielnik, B. (1988). Ficción científica y relatividad general. *Avance y Perspectiva* , 35, 34-40.
- Mitra, A., Corda, C., & Mosquera-Cuesta, H. (2021). Cómo distinguir un imitador de agujero negro magnetizado astrofísico real de un agujero negro verdadero (teórico). *Astrophysics and Space Science*, 25. doi:10.1007/s10509-020-03913-3
- NASA Ciencia. (21 de enero de 2001). Nueva evidencia de agujeros negros. (NASA) Recuperado el 20 de enero de 2022, de https://ciencia.nasa.gov/science-at-nasa/2001/ast12jan_1
- Nieva, J. (2014). Interacción de radiación electromagnética. *Aportes Científicos en PHYMATH*, 61-75.
- OKDIARIO. (14 de 11 de 2017). Diferencia entre agujeros negros y agujero de gusanos. (OKDIARIO) Recuperado el 20 de enero de 2022, de <https://okdiario.com/curiosidades/diferencias-agujeros-negros-gusano-570396>
- Okay, M., & Ovgun, A. (2022). Nonlinear electrodynamics effects on the black hole shadow, deflection angle, quasinormal modes and greybody factors. *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, 009. doi:10.1088/1475-7516/2022/01/009
- Rojas, W. (18 de noviembre de 2015). Ecuaciones de Maxwell y el campo electromagnético. Recuperado el 07 de enero de 2022, de https://www.researchgate.net/profile/Wilson-Rojas-3/publication/284730317_ecuaciones_de_Maxwell_y_el_campo_EB/links/565864a708aeafc2aac2d9f1/ecuaciones-de-Maxwell-y-el-campo-EB.pdf
- Rosales, L., Jarrouj, Y., & Serrano, O. (2007). SIMULACIÓN DE ONDAS GRAVITACIONALES EN COORDENADAS DE BONDI-SACHS. *Universidad, ciencia y tecnología*.
- Ryzhak, E., & Synyukhina, S. (2022). On stability and instability of stratified elastic solids in a gravity field. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 103990. doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2022.103990
- Sorge, F. (2021). Gravitational Waves and Helicity in Undoped Graphene. 200122. doi:10.1002/andp.202000122
- Srivastava, M., & S. S. (2022). Non-trivial quantum fluctuations in asymptotically non-flat black-hole space-times. 168829. doi:10.1016/j.aop.2022.168829

- Suárez, F., & Rosales, L. (2019). Simulación de ondas gravitacionales cuasi esféricas en la formulación característica . Espirales, 179-202.
- Toniato, J. (2019). The description of gravitational waves in geometric scalar gravity. European Physical Journal C, 680. doi:10.1140/epjc/s10052-019-7204-7
- UDLA. (2022). Biblioteca Virtual. Obtenido de Scopus: <https://www-scopus-com.bibliotecavirtual.udla.edu.ec>
- Vincent, F., Paumard, T., Gourgoulhon, E., & Perrin, G. (2011). GYOTO: a new general relativistic ray-tracing code, Class. Quant. Grav. , 1-20.
- Will, C. (2004). The Confrontation between General Relativity and Experiment. Living Rev. Relativity., 1-117.
- Yunes, N., & Siemens, X. (2013). Gravitational-Wave Tests of General Relativity with Ground-Based Detectors and Pulsar-Timing Arrays. Living Rev. Relativity., 1-123.

Contribución de Autores

Autor	Contribución
Franyelit Suárez-Carreño	Concepción y diseño del artículo, metodología, revisión, búsqueda bibliográfica, búsqueda de información