

EL ORIGEN ASTROFÍSICO O COSMOLÓGICO DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS

JORGE IGNACIO LARA MEJÍA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

MEDELLÍN

2018

EL ORIGEN ASTROFÍSICO O COSMOLÓGICO DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS

JORGE IGNACIO LARA MEJÍA

**Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Ciencias Naturales y Matemática**

Asesor

JORGE IVÁN ZULUAGA CALLEJAS

PhD en Astrofísica

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

ESCUELA DE INGENIERÍAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS NATURALES Y MATEMÁTICA

MEDELLÍN

2018

Abril 10 de 2018

JORGE IGNACIO LARA MEJÍA

“Declaro que esta tesis (o trabajo de grado) no ha sido presentada para optar a un título, ya sea en igual forma o con variaciones, en esta o cualquier otra universidad” Art 82 Régimen Discente de Formación Avanzada.

Firma

Jorge Ignacio Lara Mejía

C. C. 71.685.130 de Medellín

Dedicatoria

A la memoria de mi madre Cecilia Mejía de Lara

A mi padre Bernardo de Jesús Lara Arbeláez

Y a mis hermanos y hermanas:

Sergio de Jesús Lara Mejía

Silvia María Lara Mejía

Gloria Patricia Lara Mejía

Alfonso Lara Mejía

Quienes, con su amor y apoyo,

me han brindado la posibilidad de

crecer como persona y como profesional.

Agradecimientos

Expreso mis agradecimientos a:

GOBERNACIÓN DE ANTIOQUIA, con su programa Becas de Maestría.

JORGE IVAN ZULUAGA CALLEJAS, PhD en Astrofísica, director de este trabajo de grado.

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA, por brindarme su espacio físico y virtual para la realización de la Maestría.

MARÍA LUZ AIDA SABOGAL TAMAYO, coordinadora de la Maestría en Ciencias Naturales y Matemáticas, quien siempre me guio, apoyó y asesoró.

DIEGO ALEJANDRO MUÑOZ DURANGO, coordinador de trabajos de grado de la Maestría en Ciencias Naturales y Matemáticas, por su apoyo y asesoría.

DOCENTES DE LA UPB, que me formaron desde las diferentes asignaturas de la Maestría.

MIS COMPAÑEROS DE MAESTRÍA, docentes de las diferentes regiones y municipios del Departamento de Antioquia, con quienes compartí en mis momentos de aprendizaje.

MI FAMILIA, quienes siempre me han apoyado, guiado y motivado en la realización de mis proyectos y formación profesional. A mi hermana Silvia, quien me apoyó y ayudó en la búsqueda y organización de información.

I. E. R. BENIGNO MENA GONZÁLEZ, donde laboro, a su Rector Martín Felipe Uribe I, Docentes, Administrativos y Comunidad Educativa en general, quienes me apoyaron y acompañaron durante mi proceso en la Maestría.

JURADOS:

PABLO A. CUARTAS, Doctor en Física, Experto en Astrofísica y Docente Universidad de Antioquia.

JAIME HUMBERTO HOYOS BARRIOS, Doctor en Física, Experto en Astrofísica y Docente Universidad de Medellín.

COLABORADORES EN PROCESOS TÉCNICOS:

ANDRÉS TENELANDA, por su asesoría y aporte en el diseño del Producto Digital Interactivo de la Tabla Periódica.

PAPELERÍA GANESHA y a MASTER PRINT DIGITAL por su aporte en la organización e impresión del material del Juego sobre la Nucleosíntesis.

Tabla de contenido

Glosario	XIII
Resumen	XVIII
Introducción	20
1. Diseño teórico	23
1.1. Planteamiento del problema	23
1.2. Objetivos	24
1.2.1. Objetivo general	24
1.2.2. Objetivos específicos:	25
2. Diseño metodológico	26
3. Marco teórico	30
3.1. El origen astrofísico o cosmológico de los elementos químicos	30
3.1.1. Generalidades sobre el origen de los elementos químicos	30
3.1.2. Procesos de formación y desintegración nuclear	31
3.1.2.1. <i>La fusión nuclear</i>	31
3.1.2.2. <i>El proceso-s</i>	32
3.1.2.3. <i>El proceso-r</i>	35
3.1.2.4. <i>El proceso-p</i>	37
3.1.2.5. <i>La fisión nuclear</i>	38
3.1.2.6. <i>La desintegración β</i>	39
3.1.2.7. <i>La desintegración radiactiva natural</i>	41
3.1.2.8. <i>La fotodesintegración</i>	41
3.1.2.9. <i>El astillamiento</i>	42

3.1.3. Energía de enlace nuclear por partículas o nucleones	42
3.1.4. Procesos de nucleosíntesis	63
3.1.4.1. <i>Nucleosíntesis primordial o primigenia</i>	64
3.1.4.2. <i>Nucleosíntesis estelar</i>	78
3.1.4.3. <i>Nucleosíntesis explosiva o en supernovas</i>	98
3.1.4.4. <i>Nucleosíntesis interestelar</i>	112
4. Productos obtenidos	117
4.1. Tabla periódica digital interactiva con el origen de los elementos químicos	117
4.2. Recursos pedagógicos para la enseñanza del origen cosmológico de los elementos químicos	129
4.2.1. Unidades temáticas	133
4.2.2. Secuencias didácticas	134
4.2.3. Recurso o material didáctico	147
Conclusiones	167
Recomendaciones	170
Referencias bibliográficas	171

Lista de figuras

Figura 1: Gráfica Energía de Enlace Nuclear (E_b) Vs Número de Masa Atómica (A) de Isótopos Abundantes.	48
Figura 2: Gráfica Energía de Enlace Nuclear por Partícula (E_b/A) Vs Número de Masa Atómica (A) de Isótopos Abundantes.	49
Figura 3: Gráfica Diferencia Porcentual de las Energía de Enlace Nuclear Teórica y Experimental ($ E_{bt} - E_b /E_b$) Vs Número de Masa Atómica (A) de Isótopos Abundantes.	51
Figura 4: Gráfica de Comparación de la Tendencia en las Energías de Enlace Nuclear Total Vs Número de Masa Atómica (A) de Isótopos Abundantes.	52
Figura 5: Gráfica Energía U Vs Número de Masa Atómica (A), para $A < 56$.	61
Figura 6: Gráfica Energía U Vs Número de Masa Atómica (A) para $A > 56$.	62
Figura 7: Diagrama Historia del Universo de Fermilab, (Bill Gusky, 1984)	70
Figura 8: La evolución de las abundancias de elementos ligeros con el tiempo en el modelo estándar de la nucleosíntesis del Big Bang.	76
Figura 9: Diagrama Hertzsprung-Russell (H-R)	82
Figura 10: El Ciclo C-N-O.	90
Figura 11: El Tri-Ciclo C-N-O-F.	91
Figura 12: Proceso-s, secuencia de captura de neutrones a partir del Hierro (Fe) hasta el Cobre (Cu).	96
Figura 13: Proceso-r, secuencia de captura de neutrones a partir del Hierro (Fe) hasta el Níquel (Ni).	109
Figura 14: Proceso-r, secuencia de captura de neutrones a partir del Iterbio (Yb) hasta el Oro (Au).	110
Figura 15: Tabla periódica con el origen de los elementos químicos en la naturaleza.	122
Figura 16: Código de colores según el tipo de Nucleosíntesis para los elementos químicos en la Tabla Periódica Digital Interactiva.	123
Figura 17: Ejemplo de la información básica de cada elemento químico por celda en la Tabla Periódica Digital Interactiva.	123

Figura 18: Tablero del juego “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”	152
Figura 19: Casilla de Inicio (Big Bang / Origen del Universo) y secuencia de casillas de Elementos Químicos (Hidrógeno, Helio y Litio).	153
Figura 20: Casilla Final (Universo / Lograste el Viaje a través de la Nucleosíntesis) y secuencia de casillas de Elementos Químicos (Torio, Protactinio y Uranio).	153
Figura 21: Casilla de Preguntas (Preguntas: Sobre Partículas y Átomos) y casillas de Elementos Químicos (Oxígeno y Flúor).	154
Figura 22: Casilla de Reto (Reto 2: Sobre Nucleosíntesis) y casillas de Elementos Químicos (Tungsteno/Wolframio y Renio).	158
Figura 23: Partículas Nucleares de Protones (p^+) y Neutrones (n^0).	161
Figura 24: Fichas de Jugadores y Dado.	162
Figura 25: Tarjetas de Elementos Químicos.	162

Lista de tablas

Tabla 1: Energía de enlace nuclear para los isótopos más abundantes de los elementos químicos. 46

Tabla 2: Energía de enlace nuclear para los isótopos estables de los elementos químicos y ajuste lineal de la energía de enlace. 53

Lista de símbolos y abreviaturas

A:	Número másico de un átomo.
ADN:	Ácido desoxirribonucleico.
AGB:	Asymptotic giant branch.
C:	Velocidad de la luz.
cm³:	Centímetro cúbico.
CNO:	Ciclo Carbono-Nitrógeno-Oxígeno.
CNO-F:	Ciclo Carbono-Nitrógeno-Oxígeno-Flúor.
E:	Energía.
Eb:	Energía de enlace por partícula o nucleón.
Ebl:	Energía de enlace lineal.
Ebt:	Energía de enlace total.
erg:	Ergio.
Eu:	Energía del Universo.
eV:	Electrón voltio.
e⁻:	Electrón.
e⁺:	Positrón.
GeV:	Giga electrón voltio.
g:	Gramo.
H-R:	Hertzprung-Russell.
HTML:	HyperText Markup Language (lenguaje de programación Web).
J:	Joule.
K:	Kelvin.
k:	Constante de Boltzmann.
Kg:	Kilogramo.
LIGO:	Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory.
m:	Metro.
M_A:	Masa del Número Másico A.

M_E:	Masa estrella.
MEN:	Ministerio de Educación Nacional.
MeV:	Mega electrón voltio.
M_n:	Masa del neutrón.
M_p:	Masa del protón.
M_{Sol}:	Masa del Sol.
N:	Número de neutrones.
NS:	Nucleosíntesis.
n°:	Neutrón.
PEI:	Proyecto Educativo Institucional.
p^+:	Protón.
s:	Segundo.
SGML:	Standard Generalized Markup Language
SN:	Supernova.
T:	Temperatura.
T_U:	Temperatura del Universo.
TIC:	Tecnologías de la Información y la Comunicación.
U:	Energía potencial nuclear.
u:	Unidad de Masa Atómica.
Web:	Hace referencia a Sitio o Página que se encuentra en la red de Internet.
W3C:	World Wide Web Consortium.
WWW:	World Wide Web.
X:	Símbolo para hacer referencia a un elemento químico cualquiera.
Y:	Símbolo para hacer referencia a un elemento químico cualquiera.
Z:	Número Atómico de un átomo.
α:	Alfa, letra griega con la que se representa el núcleo de Helio.
β:	Beta, letra griega con la que se representa el proceso de desintegración beta.
γ :	Gamma, letra griega con la que se representa el fotón.
ρ:	Ro, letra griega con la que se representa la densidad.
ν:	Neutrino
$\bar{\nu}$:	Antineutrino

Glosario

ANTINEUTRINO: ($\bar{\nu}$), es la antipartícula del neutrino, con masa unas diez mil veces menor que el electrón, es de carga nula y se produce en procesos de desintegración beta; existen tres clases: antineutrino electrónico ($\bar{\nu}_e$), antineutrino muónico ($\bar{\nu}_\mu$) y antineutrino tauónico ($\bar{\nu}_\tau$).

BARIONES: son partículas que se forma por confinamiento de tres quarks. El Protón y el Neutrón, son dos bariones.

BOSONES: son partículas elementales que transporta y/o transmiten las fuerzas de interacción que se presentan entre los fermiones (quarks y leptones). Se han identificado los siguientes tipos de bosones: el fotón γ , el bosón Z, el bosón W, el gluon g y el bosón de Higgs.

ELECTRÓN: (e^-), es una partícula subatómica con carga eléctrica negativa y es uno de los componentes fundamentales del átomo.

ESTRELLAS: son objetos celestes formados de gas en estado de plasma, que emiten radiación electromagnética de todos los tipos, en especial la luz visible y el infrarrojo. El Sol es la estrella que se encuentra más cerca de la Tierra.

ESTRELLAS ENANAS BLANCAS: son en sí, núcleos muy densos de estrellas de baja masa (como el Sol), que se forman al final de la vida normal de éstas, luego de la etapa de gigante roja, cuando pierden sus capas externas (en forma de nebulosa planetaria).

ESTRELLAS GIGANTES ROJAS: son estrellas grandes de coloración roja y naranja, luminosa y de baja temperatura, que se forma en la última fase de vida en estrellas de baja masa (como el Sol), luego de la secuencia principal.

ESTRELLAS SUPERGIGANTES ROJAS: son estrellas muy grandes de coloración roja y naranja, luminosa y de baja temperatura, que se forma en la última fase de vida en estrellas de gran masa o masivas, luego de la secuencia principal.

ESTRELLAS DE NEUTRONES: son en sí, núcleos colapsados de estrellas supergigantes rojas que explotaron como supernovas. Su nombre se debe a que sus átomos están muy comprimidos, de tal manera que los protones y los electrones se unen para formar neutrones. Son muy densas.

ESTRELLA WOLF-RAYET: son estrellas hipergigantes variables azules, muy grandes, masivas y brillantes, con más de 20 a 30 masas solares.

FERMIONES: son las partículas básicas que constituyen la materia. Se conocen dos tipos de fermiones: los quarks y los leptones.

FOTÓN: (γ), es la partícula elemental o cuanto (paquete) de energía, responsable de las manifestaciones cuánticas del espectro electromagnético, del cual hacen parte: los rayos gamma, los rayos x, los rayos ultravioletas, la luz visible, los rayos infrarrojos, las microondas y las ondas de radio.

FUERZA DE LA GRAVEDAD: desde la visión Newtoniana, la Gravedad es la fuerza de atracción que la tierra u otro cuerpo ejercen sobre otro; es una fuerza que afecta a todos los cuerpos con masa. Además, desde la visión Relativista, la Gravedad es una deformación geométrica del espacio-tiempo, debido al efecto de la masa de los cuerpos.

FUERZA DEBIL: es la responsable de la desintegración radiactiva llamada (decaimiento beta), donde un neutrón se transforma en un protón y se expulsa una partícula beta.

FUERZA ELECTROMAGNÉTICA: es la que afecta los cuerpos eléctricamente cargados, está involucrada en las transformaciones físicas y químicas de átomos y moléculas, y tiene dos sentidos positivo y negativo.

FUERZA FUERTE: es la que mantiene unidos los componentes de los núcleos atómicos, como los protones y neutrones.

FUERZAS FUNDAMENTALES: son las fuerzas del universo mediante las cuales interactúan las partículas subatómicas entre sí de forma esencial. En la actualidad se conocen cuatro: gravitatoria, electromagnética, nuclear fuerte y nuclear débil.

HADRONES: son partículas subatómicas formadas por quarks que se encuentran unidos por la interacción nuclear fuerte entre ellos. Se agrupan en dos familias bariones y mesones.

ISÓTOPO: son átomos de un mismo elemento, que presentan diferente Número Másico (A) y Masa Atómica, debido a que contienen diferente número de Neutrones (n°) en el núcleo.

LEPTÓN: son partículas elementales que poseen masa y carga eléctrica. Existen seis clases de leptones. Ejemplo de leptones son: el electrón (e^-), el muón (μ), el tau (τ), el neutrino electrónico (ν_e), el neutrino muónico (ν_μ) y el neutrino tauónico (ν_τ).

MESÓN: son partículas subatómicas compuestas en estado quark-antiquark. Tiene una masa comprendida entre la del electrón y la del protón.

NEUTRINO: (ν), partícula subatómica de tipo fermiónico, sin carga y con masa unas diez mil veces menor que el electrón; se produce en procesos de desintegración beta; existen tres clases: neutrino electrónico (ν_e), neutrino muónico (ν_μ) y neutrino tauónico (ν_τ).

NEUTRÓN: (n°), partícula elemental subatómica presente en el núcleo del átomo que no tiene carga eléctrica y está compuesto por tres quarks (un up y dos down).

NUCLEÓN: es cada una de las partículas elementales (protones y neutrones) que forman el núcleo atómico.

POSITRÓN: (e^+), partícula elemental, antipartícula del electrón (antielectrón). Tiene igual masa y carga eléctrica que el electrón, pero positiva.

PROTÓN: (p^+), partícula subatómica con carga eléctrica positiva que se localiza en el núcleo atómico y está compuesto por tres quarks (dos up y un down).

QUARKS: partículas elementales más pequeñas que conforman la materia, se combina para crear otras, incluidos los protones y los neutrones; cada uno de los cuales consta de tres quarks. Además, son las únicas partículas que interactúan con las cuatro fuerzas fundamentales del universo. Se hace referencia de seis tipos de quarks, que han sido llamados: up (u), down (d), charm (c), strange (s), top (t) y bottom (b).

SUPERNOVAS: son grandes explosiones que se presentan en la etapa final de la vida de las estrellas de gran masa o masivas.

Resumen

Este trabajo de investigación centra su objeto de estudio en el origen de los elementos químicos, desde el principio del universo hasta el presente, teniendo como base la teoría del Big Bang.

Se inicia el estudio con el proceso de *Nucleosíntesis Primordial*, a través del cual se originó el Hidrógeno y el Helio, los dos elementos químicos más livianos y abundantes en el Universo.

Luego se hace referencia al proceso de *Nucleosíntesis Estelar*, por medio del cual se da el origen de los elementos químicos de masa media, que se presenta durante el ciclo de vida de las estrellas, en sus etapas de secuencia principal, gigante roja y supergigante roja.

Posteriormente se aborda el proceso de *Nucleosíntesis Explosiva*, en el cual se logra formar los elementos químicos más pesados, cuando la estrella explota como supernova, esparciendo todo su contenido al espacio.

Y la *Nucleosíntesis Interestelar*, que se produce en el medio interestelar e involucra elementos pesados que se descomponen en otros más livianos por medio de radiación cósmica, desintegración radiactiva y por fisión nuclear.

Además, se presenta el desarrollo de una Tabla Periódica Digital Interactiva con el Origen de los Elementos Químicos, en la cual se compila información básica y exclusiva sobre los 92 elementos químicos desde el Hidrógeno hasta el Uranio, en cuanto a sus datos básicos, isótopos, origen, distribución y abundancia en el Universo e importancia para la vida.

Finalmente, se comparte un material o recurso didáctico, que corresponde a un juego de mesa titulado “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis” con el cual, el producto teórico obtenido de la investigación y la información compilada en la tabla periódica digital interactiva ya mencionada, se puede llevar al aula de clase para una mejor comprensión de la química, del origen de la materia y de los elementos químicos en el universo.

Palabras clave:

Big Bang; Nucleosíntesis; Fusión nuclear; Estrella; Supernova; Evolución estelar; Elementos químicos.

Introducción

A la mayoría de las personas, cuando se les mencionan los elementos químicos y se les pregunta que saben o conocen de éstos, tienen por lo general una referencia gráfica centrada en la tradicional tabla periódica, de la cual recuerdan algunos símbolos, números atómicos, tipos de elementos, características físicas y químicas, entre otros datos; además que, están conformados por átomos y a su vez éstos, por partículas más pequeñas como protones (p^+), neutrones (n^0) y electrones (e^-). Se aprecia en sí, un conocimiento básico en general, sobre la existencia de los elementos químicos en la naturaleza y cómo estos hacen parte de nuestras vidas, presentes en muchos materiales, sustancias y hasta en nuestros propios cuerpos. Siendo muy común, explicar por ejemplo que, la molécula del agua está compuesta por Hidrógeno (H) y Oxígeno (O); que el almidón y el azúcar presentes en los alimentos, son ricos en Carbono (C) e Hidrógeno (H); que la sangre contiene en su hemoglobina Hierro (Fe); que el Ácido Desoxirribonucleico (ADN) que estructura los genes y cromosomas, contiene Nitrógeno (N) y Fósforo (P); y hasta las joyas más valiosas se elaboran de Oro (Au) y Plata (Ag); entre muchos otros ejemplos cotidianos.

Ahora, lo más interesante del caso es que, en el común de la gente, poco se cuestiona sobre el origen de dichos elementos, asumiéndolos como propios de la Tierra, tanto de su composición, como de su origen de acuerdo a lo que se conoce con referencia a la teoría del Big Bang, sin trascender a planteamientos más profundos como ¿de dónde provienen en sí cada tipo de elemento?, ¿cómo se formaron o se originaron? y ¿cómo se diseminaron o dispersaron por todo el universo?, entre algunas otras preguntas que pueden alcanzar una perspectiva más filosófica y existencialista.

Quedan muchas preguntas abiertas acerca de la existencia de los elementos químicos en la Tierra y en todo el Universo, llamando la atención y capturando el interés, por su connotación en el campo de la astronomía, en cuanto a los temas sobre el origen del universo, la evolución estelar, el origen de la materia y la vida en la Tierra, la pregunta sobre ¿Cuál es el origen de cada elemento químico de la naturaleza?, desde la cual se enfoca y orienta este trabajo de investigación de tipo documental y de profundización en el campo de la Astrofísica, fundamentado a partir de la teoría del Big Bang y de investigaciones posteriores que han dado grandes aportes a dicha teoría.

Se incursiona en este trabajo en conocer, teorizar, compilar y organizar, información referente al origen de los elementos químicos desde el Hidrógeno (H) hasta el Uranio (U), que son en sí, los 92 elementos químicos descubiertos más estables en la naturaleza, de los cuales algunos cumplen una función básica para la vida en la Tierra; entendiéndose el concepto de “estable” como, elemento químico que tiene al menos un isótopo cuyo tiempo de vida media, es de la edad del Universo o del mismo orden de magnitud. Y así mismo, se profundiza en el estudio e investigación en temas relacionados como: la evolución estelar, la composición del Universo, las partículas subatómicas y el origen de la materia, entre otras.

Con el desarrollo de este trabajo, se revisaron investigaciones en el campo de la astrofísica sobre el origen o formación de los elementos químicos en el universo, tema conocido específicamente como Nucleosíntesis Atómica. A partir de dicha información, se han elaborado un contenido teórico, una tabla periódica digital y un recurso didáctico.

En cuanto al contenido teórico del trabajo, se hace referencia al tema sobre la nucleosíntesis atómica y los diferentes procesos nucleares que han permitido el origen de los elementos químicos en el universo, desde los primeros segundos del Big Bang, hasta la actualidad, que ocurren en estrellas y explosiones de supernovas.

De igual forma, se recopiló información básica de los 92 elementos químicos en estudio, en cuanto a sus orígenes cosmológicos, reacciones de nucleosíntesis, sus componentes subatómicos, nucleones y electrones, su presencia en la Tierra, seres vivos e importancia o función para la vida, en una tabla periódica digital interactiva, la cual se encuentra en el Sitio Web, “Tabla Periódica con el Origen de los Elementos Químicos Estables en la Naturaleza”, en el enlace o link: <http://urania.udea.edu.co/users/jlara/>

Finalmente, se aplica este proyecto de investigación en la enseñanza de las Ciencias Naturales a nivel de la básica secundaria y media, implementando actividades con material pedagógico y didáctico, sobre el origen y la formación de los elementos químicos, de tipo práctico como, el juego de mesa “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”. Actividad que se debe trabajar con apoyo de la Tabla Periódica Digital Interactiva con el Origen de los Elementos Químicos.

Esta investigación, se convierte en uno de los trabajos que reúne y presenta información específica sobre el origen de los elementos químicos en el Universo, sirviendo de apoyo académico y didáctico para la enseñanza de las Ciencias Naturales y la Astronomía.

1. Diseño teórico

1.1. Planteamiento del problema

“El Origen Astrofísico o Cosmológico de los Elementos Químicos de la Naturaleza”, es una propuesta de investigación que ha surgido del interés por el estudio de la Astronomía, sobre el origen de la materia en el Universo y los procesos de evolución estelar.

Hacemos parte de un vasto Universo, rodeados de una gran variedad de seres, objetos, sustancias y materiales, con los cuales compartimos similitudes en composición y estructura atómica. Desde los objetos más grandes, hasta los más pequeños que podemos observar a simple vista, están conformadas por estructuras aún más pequeñas, como lo son, las moléculas y los átomos de los diferentes elementos químicos. Siendo éstos a su vez, formados por partículas subatómicas. Es así como, los protones, están formados por quarks: dos up y un down; el neutrón, formado igualmente por quarks: dos down y un up; y los electrones son un tipo de leptón.

Es aquí donde surgen diferentes preguntas como: ¿si estamos formados por átomos de diferentes elementos químicos, de dónde han surgido estos?, ¿han tenido todos los elementos químicos el mismo origen? y ¿qué procesos físicos han posibilitado la formación de los elementos químicos?

De todos estos cuestionamientos, se puede definir una pregunta central como: ¿Cuál es el origen cosmológico de cada elemento químico de la naturaleza?, con la cual se enfoca y orienta este proyecto de investigación.

Por tal motivo, se propone un trabajo de investigación de tipo documental, para estudiar y comprender el proceso del origen astrofísico de los elementos químicos, desde el Hidrógeno hasta el Uranio, por ser estos los que hacen parte de la estructura, la composición de la Tierra y algunos se encuentran presentes y son esenciales en los seres vivos. En cuanto a los elementos transuránicos, no se tendrán en cuenta en este trabajo de investigación, puesto que sus orígenes o síntesis son de tipo artificial e inestable, es decir que se desintegran rápidamente y por lo tanto los objetos del Universo y en particular de la vida cotidiana no los contienen.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Identificar los procesos astrofísicos que dan origen a los 92 elementos químicos, desde el Hidrógeno hasta el Uranio, los cuales hacen parte de la estructura y composición de la Tierra, donde algunos de ellos se encuentran presentes y son esenciales en los seres vivos.

1.2.2. Objetivos específicos:

- Identificar y caracterizar los principales procesos que conducen a la fabricación o modificación de núcleos atómicos en el universo.
- Identificar cuales o en qué procesos se producen los diferentes elementos químicos.
- Determinar las familias de elementos químicos de acuerdo con su proceso de Nucleosíntesis.
- Establecer las estructuras o los procesos biológicos en los que algunos elementos claves juegan una función para la vida.
- Recopilar la información de los 92 elementos químicos desde el Hidrógeno hasta el Uranio, en cuanto a su origen cosmológico, su presencia en la Tierra e importancia para la vida.
- Desarrollar un Sitio Web, sobre el origen cosmológico de los elementos químicos, donde se publique el contenido de la investigación, contando con una Tabla Periódica digital interactiva.
- Diseñar un Recurso o Material Didáctico, por medio del cual se logre la enseñanza sobre el origen de los elementos químicos.

2. Diseño metodológico

Con el fin de realizar el trabajo de investigación sobre “El origen astrofísico o cosmológico de los elementos químicos”, enmarcado en el campo de la Astrofísica y la Astronomía, se encontró pertinente realizarlo a través de un proceso de *Investigación Documental*, la cual permite la recopilación, estudio, análisis y teorización del tema, entendiéndose mejor como lo explica Carlos Muñoz:

Son trabajos cuyo método de investigación se concentra exclusivamente en la recopilación de datos de fuentes documentales, ya sea de libros, textos, sitios Web o cualquier otro tipo de documentos gráficos, iconográficos y electrónicos. Su único propósito es obtener antecedentes documentales para profundizar en teorías, leyes, conceptos y aportaciones ya existentes y asentadas en documentos sobre el tema que es objeto de estudio, para luego complementar, refutar o derivar, en su caso, nuevos conocimientos.

En concreto, son aquellas investigaciones en cuya recopilación de información únicamente se utilizan documentos (en papel, iconográficos y electrónicos) que aportan antecedentes sobre el tema en estudio nuevos. (Muñoz, 2011, p.14).

Además, de la recopilación y procesamiento de la información en este trabajo, se han realizados estudios y análisis de datos en proceso nucleares en cuanto a las energías de enlaces

por nucleón; al igual que la elaboración de un recurso digital multimedia (véase: Tabla Periódica Digital Interactiva sobre el Origen de los Elementos químicos, Sección 4.1.) y el diseño de un material didáctico (véase: Recursos Didácticos para la Enseñanza del Origen Cosmológico de los Elementos Químicos, Sección 4.2.), con el fin de proyectar este trabajo al estudio de la astronomía y la enseñanza de las Ciencias Naturales a nivel escolar de la básica secundaria y media, al igual que en la educación superior.

Para lograr estos productos y en general los objetivos del proyecto de investigación se han planeado y desarrollado una serie de “Fases”, que han permitido el desarrollo ordenado y metódico del proceso, las cuales se presenta a continuación:

Fase 1: Definición de la temática de investigación del proyecto:

Se plantea inicialmente el problema de investigación, con el cual se define el objeto de estudio sobre el origen astrofísico o cosmológico de los 92 elementos químicos desde el Hidrógeno hasta el Uranio, específicamente en el tema de la nucleosíntesis atómica. También, se proponen los objetivos del proyecto, se justifica y se desarrolla el estado del arte de la investigación, se proponen y planean los productos a desarrollar tanto teórico, digital y didáctico.

Fase 2: Revisión bibliográfica y documentación teórica sobre la temática a investigar:

Se realiza una recopilación bibliográfica de artículos, documentos y otros medios de información y documentación consultados en bases de datos, buscadores, libros y sitios web,

sobre el origen de los elementos químicos, nucleosíntesis, evolución estelar, elementos químicos y explosión de supernovas, entre otros.

Fase 3: Procesamiento de la información recopilada:

En esta fase se procede a realizar el estudio, el análisis y procesamiento de la información adquirida en la Fase 2, como la lectura de artículos, libros y documentos; al igual que la elaboración de tablas y gráficos en Excel, con sus respectivos análisis; además del estudio y manejo del lenguaje HTML y su correspondiente Software.

Fase 4: Elaboración de los contenidos y productos del proyecto:

Se procede a elaborar los contenidos teóricos, productos digitales y didácticos, con los cuales se fundamenta el proyecto de investigación, como la elaboración del marco teórico del proyecto y los productos digitales como los archivos en formato HTML, de cada uno de los 92 elementos químicos y de la Tabla Periódica Digital Interactiva, en formato HTML, los recursos didácticos como el juego y las secuencias didácticas.

Fase 5: Presentación del Proyecto de Investigación:

En esta fase se procede a hacer la presentación del proyecto ante los entes revisores y evaluadores de la maestría y jurados. Dicho proyecto se sustenta bajo un formato físico impreso, en medio digital y con el montaje de un Sitio Web.

Además, se presentará el proyecto ante el Consejo Académico, estudiantes y comunidad en general de la Institución Educativa Rural Benigno Mena González del municipio de San Jerónimo, Antioquia; al igual que, en otros espacios académicos que lo requieran del municipio, del departamento y la nación.

Fase 6: Implementación del proyecto de investigación en la institución educativa:

En esta fase se implementará el proyecto de investigación como material o herramienta pedagógica para la enseñanza de las Ciencias Naturales a nivel escolar de la básica secundaria y media, articulado al Proyecto Educativo Institucional (PEI) “Ciudad Competencias” y coordinado desde la casa del conocimiento (aula de clase) “Observatorio Planeta Tierra”, del área de Ciencias Naturales y Ambiental, en la Institución Educativa Rural Benigno Mena González.

3. Marco teórico

3.1. El origen astrofísico o cosmológico de los elementos químicos

3.1.1. Generalidades sobre el origen de los elementos químicos

Para dar inicio al estudio sobre el origen astrofísico o cosmológico de los elementos químicos, es importante remitirnos inicialmente a la teoría del Big Bang, en la cual se plantea que el Universo empezó en un estado denso y caliente que luego se expandió súbitamente hasta el estado que se conoce en la actualidad; presentándose durante dicho proceso, que se estima de unos 13.800 millones de años, la formación u origen de la materia, desde las partículas subatómicas hasta los átomos y moléculas más complejas que se conocen.

En cuanto al tema del origen de la materia y los elementos químicos, otros científicos se interesaron en éste, como Arthur Stanley Eddington, quien en 1920 propuso que las estrellas obtenían su energía a partir de la fusión del Hidrógeno en Helio, proceso que logró ser explicado por Hans Bethe en 1939, pero no para los elementos más pesados. Consecuentemente luego de la Segunda Guerra Mundial en 1958, Fred Hoyle desarrolla su trabajo sobre la nucleosíntesis de los elementos más pesados que el Hidrógeno, que se presenta en las estrellas; le siguen y profundizan en el tema los científicos William A. Fowler, Alistair G. W. Cameron y Donald D. Clayton, en los años sesenta. Y en los años setenta el científico Steven Weinberg, realiza un estudio en cuanto a los eventos sucedidos con respecto al origen de la materia y la expansión del universo, durante los primeros minutos transcurridos después de la gran explosión; describiendo por etapas o

fotogramas como lo indica él, de acuerdo a la variación de la energía y temperatura en el universo, el proceso de la aparición de las primeras partículas subatómicas como los mesones, leptones, quarks, neutrinos, antineutrinos y fotones, entre otras; al igual que la formación de los protones y neutrones a partir de los quarks y el origen de los primeros núcleos atómicos de Hidrógeno y Helio, explicando el primer proceso de nucleosíntesis en el universo.

Desde entonces, el tema de la Nucleosíntesis ha tomado importancia en la investigación científica, en especial en el campo de la astrofísica, para el conocimiento del origen de la materia, de los elementos químicos, la energía atómica, las reacciones nucleares de fusión y de fisión, entre otros aspectos.

Para entrar en materia de estudio sobre la Nucleosíntesis y comprender el origen de los elementos químicos en el universo, es importante conocer primero una serie de procesos nucleares que son fundamentales para la síntesis de éstos.

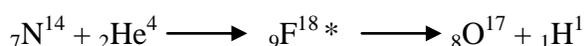
3.1.2. Procesos de formación y desintegración nuclear

3.1.2.1. *La fusión nuclear*

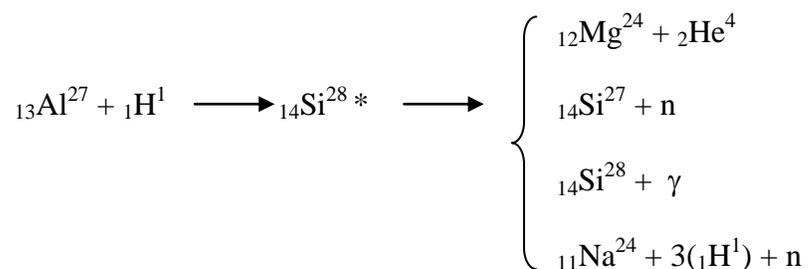
Es el proceso mediante el cual se forma un núcleo atómico a partir de la unión de dos núcleos más livianos. Este proceso sucede en condiciones de temperaturas muy altas, alrededor de 10 millones de grados Kelvin, lo que permite que se superen las fuerzas de repulsión eléctrica entre los protones, permitiendo que se unan los núcleos.

En el universo, los núcleos estelares son los lugares por excelencia que brindan las condiciones necesarias para que se produzca la fusión nuclear y por lo tanto la síntesis de muchos elementos químicos. Según como lo explica Sepúlveda (2014, p 97-98):

Una reacción nuclear de fusión puede ocurrir en dos pasos: 1) captura de un núcleo-proyectil que, absorbido por el núcleo del blanco, forman un núcleo intermedio altamente excitado (denotado con *) y, en consecuencia, inestable; 2) desexcitación, con la emisión de otro núcleo o partícula. Ejemplo:



En general, hay varios modos o “canales” de desexcitación; por ejemplo:



En muchos casos, el núcleo resultante es inestable o radiactivo, de modo que decae en otros más estables. (Sepúlveda, 2014, p. 97-98).

3.1.2.2. *El proceso-s*

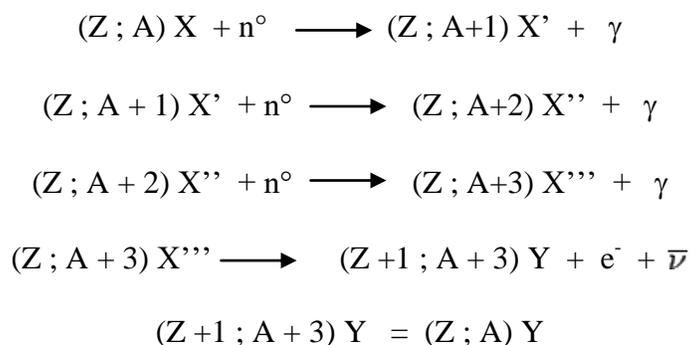
El término *s*, hace referencia a la palabra en inglés “slow” (lento). De acuerdo con el significado anterior, el *Proceso-s* consiste en la formación de núcleos de los elementos químicos más pesados, con Números Atómicos (*Z*) mayores a 26 ($Z > 26$), mediante la captura de

neutrones de forma lenta, a un ritmo cercano al de la desintegración β^- (Ver Sección 3.1.2.6.) de los neutrones, que los convierte en protones. El decaimiento de neutrones sucede antes de que ocurran nuevas capturas, produciendo un núcleo estable. “En el proceso *s* las capturas de neutrones comienzan en núcleos “semilla” con masas alrededor del grupo del hierro y alcanzan hasta el plomo y el bismuto” (Cortina y Martínez, 2008, p. 17).

Este proceso se da cuando, estrellas con masas mayores a la del Sol, se encuentra en la etapa de Gigante y Supergigante Roja de su ciclo de vida, especialmente en las situadas en la llamada “rama asintótica gigante” (conocidas como AGB: Asymptotic Giant Branch).

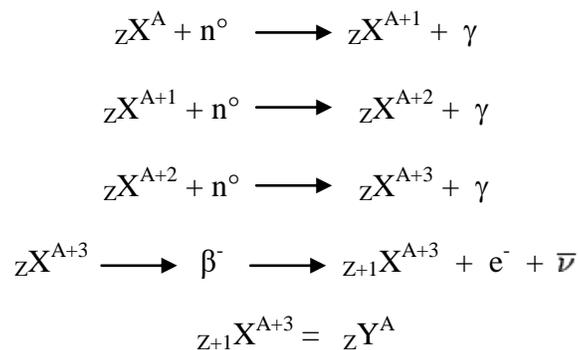
El Proceso-*s* se inicia, como ya se mencionó, a partir de un denominado elemento “semilla” X, con un Número Atómico Z y Número Másico A, el cual se puede representar como: $(Z ; A) X$. Al capturar un neutrón n^0 , su núcleo atómico se incrementa en una partícula, variando su Número Másico en 1, quedando A+1; mientras su Número Atómico Z se conserva, dando origen a un isótopo $(Z ; A+1) X'$.

Este a su vez, continúa capturando otro neutrón, con la formación de otro isótopo $(Z ; A+2) X''$; el cual puede capturar otro neutrón, para formar otro isótopo $(Z ; A+3) X'''$; y así, puede seguir realizando sucesivamente el proceso formando isótopos estables al acercarse al llamado “valle de la estabilidad”, hasta alcanzar un núcleo inestable, donde uno de sus neutrones por decaimiento o Desintegración β^- , se transmuta en protón (p^+), convirtiéndose el isótopo X''' del elemento “semilla” en un nuevo elemento más pesado y estable Y. Este proceso se puede entender mejor con las siguientes ecuaciones:

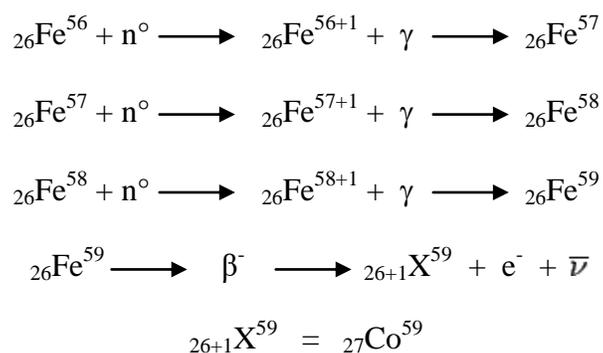


Dónde: γ , e^{-} y $\bar{\nu}$, son correspondientemente, fotones, electrones y antineutrinos, liberados durante las reacciones.

El anterior proceso, también se puede representar de la forma:



El ejemplo representativo para esta secuencia de captura de neutrones se puede indicar a partir del isótopo Hierro-56 hasta la síntesis de Cobalto-59:



En el ejemplo, el proceso se inicia con un elemento “semilla” correspondiente al Hierro-56 (${}_{26}\text{Fe}^{56}$), el cual captura un neutrón (n°), transformándose en ${}_{26}\text{Fe}^{57}$; con otra captura de neutrón en ${}_{26}\text{Fe}^{58}$; y luego con otra captura de neutrón en ${}_{26}\text{Fe}^{59}$. Este proceso se realiza de forma lenta, hasta el momento en que éste último isótopo es inestable y uno de sus neutrones se transforma en protón, convirtiéndose el isótopo ${}_{26}\text{Fe}^{59}$ en Cobalto ${}_{27}\text{Co}^{59}$; y así sucesivamente se van formando en cadena los diferentes isótopos de elementos químicos hasta la síntesis del Plomo (Pb) y el Bismuto (Bi), elementos en los cuales se detiene el proceso.

3.1.2.3. *El proceso-r*

El término **r**, hace referencia a la palabra en inglés “rapid” (rápido). De acuerdo con el significado anterior, el *Proceso-r* consiste en la formación de núcleos de los elementos químicos más pesados, mediante la captura de neutrones de forma rápida, superando la velocidad de Desintegración β^- de los neutrones, que los convierte en protones. El flujo o densidad de neutrones es muy alto, lo que permite que el núcleo capture muchos neutrones antes de que estos se conviertan en protones.

Este proceso se da cuando la estrella explota como supernova, momento en el cual la estrella libera tanta energía y partículas, entre ellas muchos neutrones, que permite la formación de elementos más pesados, en especial superiores al Bismuto (Bi), y en menor cantidad que los sintetizados por medio del Proceso-s.

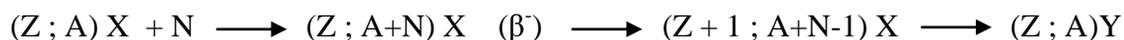
El Proceso-r se inicia, de una forma semejante a la del Proceso-s, a partir de un denominado elemento “semilla” X, con un Número Atómico Z y Número Másico A, el cual se

puede representar como: $(Z; A) X$. La gran diferencia radica en que, la captura neutrones n^0 , se realiza en mayor cantidad y de forma muy rápida, superior al proceso de Desintegración β^- . Además, desde los elementos “semilla” con masas alrededor del grupo del hierro, se logran sintetizar elementos pesados como el Radio (Ra), Torio (Th) y el Uranio (U).

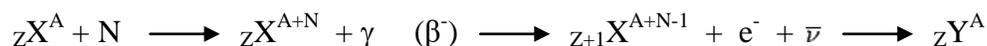
Los núcleos atómicos de elementos “semilla” $(Z ; A) X$, inician su captura de neutrones de forma sucesiva y rápida, incrementando su Número Másico en una cantidad determinada y elevada de neutrones N , quedando $A+N$; mientras su Número Atómico Z se conserva, dando origen a isótopos de tipo $(Z ; A+N) X$, inestable que no admite más neutrones, el proceso entra en un punto de equilibrio, como lo explica J. Guasp (1975):

En ese “punto de espera”, se estaciona el proceso pudiendo así transcurrir suficiente tiempo para que la desintegración β^- (o incluso en circunstancias favorables (p,n) (α,n) ó (α,p)) tenga lugar, disminuyendo el exceso de neutrones y acercando la trayectoria al valle de estabilidad. (Guasp, 1975, p. 74).

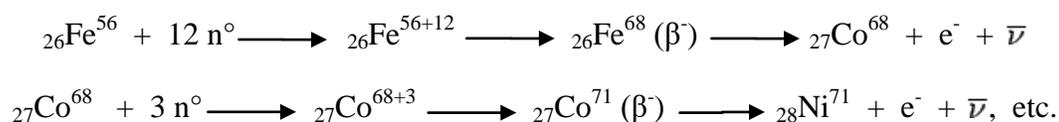
Para obtenerse un nuevo elemento del tipo $(Z + 1 ; A+N-1)X$ ó $(Z ; A)Y$. Lo anterior se puede representar mediante la secuencia de reacciones:



O también,



Como ejemplo representativo de este proceso de captura rápida de neutrones, se retoma como en el proceso-s, el isótopo Hierro-56 hasta la síntesis del Niquel-71.



En el ejemplo, el proceso se inicia con un elemento “semilla” correspondiente al ${}_{26}\text{Fe}^{56}$ (Hierro-56), el cual captura rápidamente 12 neutrones, transformándose en ${}_{26}\text{Fe}^{68}$, isótopo inestable, por lo que uno de sus neutrones mediante desintegración β^{-} se transforma en un protón, convirtiéndose el isótopo ${}_{26}\text{Fe}^{68}$ en ${}_{27}\text{Co}^{68}$ (Cobalto-68) un isótopo pesado de un nuevo elemento químico con exceso de neutrones; y así sucesivamente se van formando en cadena los diferentes isótopos de elementos químicos hasta la síntesis de elementos más pesados como el Torio (Th) y el Uranio (U).

3.1.2.4. *El proceso-p*

El término **p**, hace referencia al Protón (p^{+}). De acuerdo con esto, el *Proceso-p* consiste en la formación de elementos pesados ($Z > 26$), mediante la captura de protones, siendo un proceso adicional a la captura de neutrones por medio de los procesos r y s. Este proceso no es muy común debido a la repulsión de carga que se presenta por los protones presentes en el núcleo, como lo indica Carolina Chavero:

Sin embargo, un núcleo que contenga muchos protones tiene una elevada carga positiva que dificulta la aproximación de nuevos protones. Esta repulsión (la

barrera de Coulomb) es muy alta y determina que la captura de un protón sea un suceso mucho más raro que la de un neutrón. Para ser absorbido por un núcleo un protón libre debe ser muy energético, de forma que este proceso sólo puede darse a muy altas temperaturas. (Chavero, 2014, p. 42).

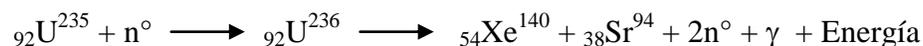
Es por esto que se presenta durante la explosión de supernovas, que brinda las condiciones de temperatura, abundancia de núcleos pesados ya formados por el proceso-s y en los mismos instantes, del proceso-r, además de reacciones en cadena que generan la liberación de protones en gran cantidad para su captura.

Este proceso da explicación a la existencia de 35 elementos pesados como: Molibdeno-92 ($_{42}\text{Mo}^{92}$), Molibdeno-94 ($_{42}\text{Mo}^{94}$), Rutenio-96 ($_{44}\text{Ru}^{96}$), Rutenio-98 ($_{44}\text{Ru}^{98}$), Lantano-138 ($_{57}\text{La}^{138}$), Samario-144 ($_{62}\text{Sm}^{144}$), el Iterbio-168 ($_{70}\text{Yb}^{168}$) y el Platino-190 ($_{78}\text{Pt}^{190}$), entre otros; pero que presentan una cantidad de neutrones relativamente baja, con respecto a los núcleos de otros elementos formados a través de los procesos r y s, que si presentan una cantidad de neutrones superior.

3.1.2.5. La fisión nuclear

Puede ocurrir por la interacción de un neutrón sobre el núcleo atómico de un isótopo o por decaimiento radioactivo, provocando la fragmentación del núcleo en dos nuevos núcleos de menor número atómico, con la liberación de dos neutrones, rayos gamma (γ) y energía. Los dos

neutrones liberados, pueden actuar sobre otros núcleos atómicos, generando una reacción en cadena de Fisión. Una reacción típica de fisión nuclear es la que presenta el Uranio-235, como se indica en la siguiente ecuación química.

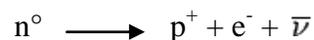


Se aprecia cómo el Uranio-236 (${}_{92}\text{U}^{236}$), se desintegra en Xenón-140 (${}_{54}\text{Xe}^{140}$) y en Estroncio-94 (${}_{38}\text{Sr}^{94}$), lo que posibilita la existencia de estos dos elementos, por medio de un proceso diferente a la nucleosíntesis estelar.

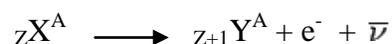
3.1.2.6. La desintegración β

La Desintegración β (Beta), es un proceso de decaimiento que se presenta entre neutrones y protones, emitiendo según el caso electrones (e^{-}) o positrones (e^{+}).

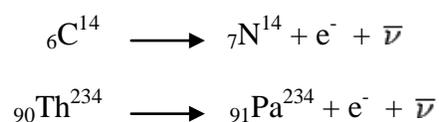
Cuando ocurre el decaimiento de un neutrón (n°) a un protón (p^{+}), liberándose un electrón (e^{-}) y un antineutrino $\bar{\nu}$, se dice que se presentó una Desintegración β^{-} .



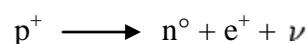
Al presentarse en un átomo de un elemento cualquiera X, se puede representar como:



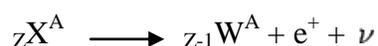
Como ejemplos de este proceso se pueden indicar las siguientes reacciones como lo presenta Alonso Sepúlveda (2014, p. 95).



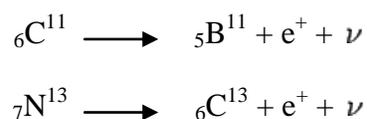
Y cuando ocurre la transmutación de un protón (p^{+}) a neutrón (n°), liberándose un positrón (e^{+}) y un neutrino (ν), se dice que se presentó una Desintegración β^{+} .



Al presentarse en un átomo de un elemento cualquiera X, se puede representar como:



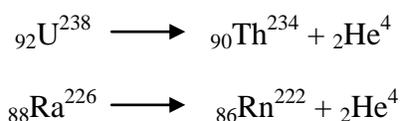
Como ejemplos de este proceso se pueden indicar las siguientes reacciones como lo presenta Alonso Sepúlveda (2014, p. 95).



Este proceso, como se estudiará más adelante, se presentó en los primeros minutos del Big Bang, con la formación de los protones y neutrones. Además, se presenta al interior del núcleo de algunos átomos, en donde sus neutrones pueden decaer a protones y viceversa.

3.1.2.7. *La desintegración radiactiva natural*

También conocida como Emisión α (Alfa), es un proceso que presentan algunos isótopos de elementos pesados e inestables como el Uranio (U), que emiten partículas α , correspondientes a núcleos de Helio-4 (${}^4_2\text{He}$), por lo que el isótopo del elemento pesado presenta una disminución de su número atómico en 2 protones y su número másico en 4 partículas, transformándose en un nuevo isótopo de un elemento químico menos pesado. Este proceso se aprecia mediante las siguientes reacciones que implican la desintegración radiactiva del Uranio-238 y el Radio-226:



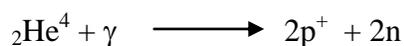
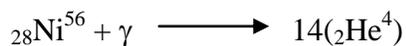
3.1.2.8. *La fotodesintegración*

Este fenómeno sucede cuando fotones de alta energía interactúan con núcleos atómicos, desintegrándolos en núcleos de Helio (partículas α) y en neutrones (n°).

Este proceso se presenta en especial en el núcleo ferroso de las estrellas en su etapa de supergigante roja, durante su colapso previo a la explosión como supernova, proporcionando la liberación de una gran cantidad neutrones y núcleos de Helio (partículas α) que continúan interactuando con más fotones, para liberar finalmente una gran cantidad neutrones y protones, que posteriormente participaran en el Proceso-r, durante la explosión de la Supernova.

Dichos procesos se pueden entender como los indica Alonso Sepúlveda:

Estos procesos de *fotodesintegración* tienen la forma:



Los anteriores son procesos endotérmicos, por lo que no permiten sostener el núcleo contra su propia gravitación; el núcleo sigue colapsándose y cada vez emite más neutrones (Sepúlveda, 2014, p.135).

3.1.2.9. *El astillamiento*

Este proceso es también conocido como *spallation* (en inglés), que consiste en la desintegración de núcleos atómicos por Radiación Cósmica, por medio de partículas p y α de alta energía, conocidos como Rayos Cósmicos. Éstos al colisionar con un núcleo de elementos químicos pesados, producen su rotura o su descomposición en otros núcleos atómicos más livianos, como es el caso del Litio (Li) y el Berilio (Be) que se originan a partir del Carbono (C).

3.1.3. **Energía de enlace nuclear por partículas o nucleones**

En el proceso de Nucleosíntesis, se presentan reacciones de fusión nuclear, que se caracterizan por la liberación de energía durante el proceso de unión de partículas atómicas o nucleones (protones y neutrones) para formar núcleos atómicos de elementos químicos cada vez

más pesados. Esto se entiende, puesto que la masa es en sí, una medida de la energía y en dicho proceso de unión de nucleones se libera energía, de tal forma que, “la energía total del sistema ligado (el núcleo) es menor que la energía combinada de los nucleones separados” (Serway, Moses y Moyer, 2006, p. 472).

A la diferencia entre la energía total de todos los nucleones y la energía total del núcleo, se conoce como Energía de Enlace Nuclear, que corresponde a la energía necesaria que se debe utilizar para descomponer un núcleo en sus partículas elementales protones y neutrones.

De acuerdo con el principio de la conservación de la energía y la relación de equivalencia entre la masa y la energía que planteó Einstein, se elabora la ecuación para la Energía de Enlace nuclear (E_b), como se indica a continuación:

$$E_b (\text{MeV}) = [Z (M_p^+) + N (M_n^\circ) - M_A] \times 931,494 \text{ MeV/u} \quad (1)$$

En donde: Z es el número atómico del isótopo del elemento a estudiar; M_p^+ es la masa del protón; N el número de Neutrones; M_n° la masa del Neutrón; M_A la masa atómica del isótopo a estudiar y $931,494 \text{ MeV/u}$, que corresponde a la masa de una unidad de masa atómica en MeV/c^2 (Serway, Moses y Moyer, 2006, p. 472).

Igualmente, autores de los años 30 desarrollaron un modelo teórico llamado el Modelo de la Gota de Agua, propuesto por C. F. von Weizsäcker (1935), que asume como analogía los nucleones como moléculas en una gota de agua, entendida ésta como el núcleo atómico. En dicho modelo, la Energía de Enlace Nuclear se ve afectada básicamente por cuatro efectos que son: el

Efecto del volumen, el Efecto de la superficie, el Efecto de la repulsión de Coulomb y el Efecto del exceso de neutrones.

En cuanto al *Efecto del Volumen*, la Energía de Enlace es proporcional al Número de Masa Atómica (A), lo que es posible al suponer o asumir la densidad nuclear constante y las masas de las partículas (protones y neutrones) son aproximadamente iguales ($1,67 \times 10^{-27}$ kg). Si el efecto anterior fuera el único, la energía de enlace por nucleón sería $E_{b1} = C_1 A$, donde C_1 es una constante por determinar.

Para el *Efecto de la Superficie*, se encuentra que la Energía de Enlace de cada nucleón en la superficie del núcleo es menor a la energía interna. Por lo que las partículas de la superficie del núcleo reducen proporcionalmente su Energía de Enlace con respecto al número de partículas en la superficie y por ende del área superficial. Sabiendo que el volumen es proporcional a A y el radio del núcleo es por tanto proporcional a $A^{1/3}$, entonces el término de área que es proporcional al radio elevado al cuadrado y se puede escribir como $E_{b2} = - C_2 A^{2/3}$.

El *Efecto de Repulsión de Coulomb*, hace referencia a la interacción de repulsión entre los protones debido a sus cargas, lo que influye en la Energía de Enlace, provocando una reducción en ésta, de forma proporcional al número de pares de protones e inversamente proporcional al radio nuclear y por consiguiente al número de masa atómica (A). De dicho planteamiento se obtiene el término: $E_{b3} = - C_3 Z (Z - 1) / A^{1/3}$.

Por último, el *Efecto del Exceso de Neutrones*, tiene su mayor incidencia en núcleos pesados, en los cuales el número de neutrones supera el número de protones en gran proporción.

Dicho exceso de neutrones, aunque le confiere cierta estabilidad al núcleo, le genera una pérdida de Energía de Enlace. Cuando en un núcleo con un A determinado, el número atómico Z y el número de neutrones N, son iguales, tiene la mayor energía de enlace; pero con N, mayor que Z, la energía disminuirá, de lo cual se deduce el término: $E_{b4} = - C_4 (N - Z)^2 / A$.

Al tomar los anteriores términos y sumarlos entre sí, se obtiene la ecuación o la llamada Fórmula semiempírica de Weizsächer (Serway, Moses y Moyer, 2006) para la Energía de Enlace Total E_{bt} , como se indica a continuación:

$$E_{bt} = E_{b1} + E_{b2} + E_{b3} + E_{b4}$$

$$E_{bt} = C_1 A - C_2 A^{2/3} - C_3 Z (Z - 1) / A^{1/3} - C_4 (N - Z)^2 / A \quad (2)$$

Para las constantes: C_1 , C_2 , C_3 y C_4 , los valores obtenidos según C. F. von Weizsächer (1935), presentados por Serway, Moses y Moyer (Serway, Moses y Moyer, 2006, p. 477), son:

$$C_1 = 15,7 \text{ MeV}$$

$$C_2 = 17,8 \text{ MeV}$$

$$C_3 = 0,71 \text{ MeV}$$

$$C_4 = 23,6 \text{ MeV}$$

Ahora, aplicando las Ecuaciones 1 y 2 para los 92 elementos químicos desde el Hidrógeno hasta el Uranio, en cuanto a sus isótopos más abundantes, se obtiene la Tabla 1, con los siguientes datos:

Tabla 1: *Energía de enlace nuclear para los isótopos más abundantes de los elementos químicos.*

ISÓTOPOS MAS ABUNDANTES DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS										
Nombre	Símbolo	Z	A	N	MA	Eb	Eb/A	Ebt	Ebt - Eb	(Ebt-Eb)/Eb
Hidrógeno	H	1	1	0	1,007825	0	0	-25,7	-25,7	
Helio	He	2	4	2	4,002603	28,2960024	7,07400059	17,0522667	-11,2437357	39,74%
Litio	Li	3	7	4	7,016004	39,2447864	5,60639805	39,1659809	-0,07880547	0,20%
Berilio	Be	4	9	5	9,012182	58,1652986	6,46281095	57,5656619	-0,59963663	1,03%
Boro	B	5	11	6	11,009305	76,2055487	6,92777715	76,1292397	-0,07630896	0,10%
Carbono	C	6	12	6	12	92,162046	7,6801705	85,7979744	-6,36407163	6,91%
Nitrógeno	N	7	14	7	14,003074	104,658974	7,47564097	104,0309	-0,62807324	0,60%
Oxígeno	O	8	16	8	15,994915	127,619377	7,97621104	122,398279	-5,22109793	4,09%
Flúor	F	9	19	10	18,998403	147,802064	7,77905598	151,15782	3,35575642	2,27%
Neón	Ne	10	20	10	19,99244	160,645507	8,03227535	159,307517	-1,33798961	0,83%
Sodio	Na	11	23	12	22,98977	186,564336	8,11149286	188,652393	2,0880573	1,12%
Magnesio	Mg	12	24	12	23,985042	198,257384	8,26072433	196,207122	-2,05026134	1,03%
Aluminio	Al	13	27	14	26,981538	224,953079	8,33159552	225,905926	0,95284696	0,42%
Silicio	Si	14	28	14	27,976927	236,537142	8,44775507	232,914141	-3,62300105	1,53%
Fósforo	P	15	31	16	30,973762	262,917061	8,48119551	262,820254	-0,0968067	0,04%
Azufre	S	16	32	16	31,972071	271,78116	8,49316126	269,314606	-2,46655465	0,91%
Cloro	Cl	17	35	18	34,968853	298,210448	8,52029852	299,329091	1,11864248	0,38%
Argón	Ar	18	40	22	39,962383	343,811752	8,59529379	346,842728	3,03097601	0,88%
Potasio	K	19	39	20	38,963707	333,7246	8,55704102	335,386533	1,66193322	0,50%
Calcio	Ca	20	40	20	39,962591	342,05309	8,55132726	340,919938	-1,13315195	0,33%
Escandio	Sc	21	45	24	44,95591	387,850939	8,61890976	392,746271	4,89533227	1,26%
Titanio	Ti	22	48	26	47,947947	418,700167	8,72292015	420,377932	1,67776447	0,40%
Vanadio	V	23	51	28	50,943964	445,842048	8,74200095	447,461157	1,61910832	0,36%
Cromo	Cr	24	52	28	51,940512	456,34651	8,77589441	456,153582	-0,19292724	0,04%
Manganeso	Mn	25	55	30	54,93805	482,071588	8,76493796	483,322934	1,25134651	0,26%
Hierro	Fe	26	56	30	55,934942	492,255615	8,79027884	491,288177	-0,96743743	0,20%
Cobalto	Co	27	59	32	58,9332	517,310017	8,76796639	518,50359	1,19357261	0,23%
Níquel	Ni	28	58	30	57,935348	506,455314	8,73198817	503,59654	-2,85877376	0,56%
Cobre	Cu	29	63	34	62,929601	551,383147	8,75211344	553,020774	1,63762724	0,30%
Cinc	Zn	30	64	34	63,929147	559,094988	8,73585919	559,675	0,58001171	0,10%
Galio	Ga	31	69	38	68,925581	601,991232	8,72451061	606,106679	4,11544671	0,68%
Germanio	Ge	32	74	42	73,921178	645,667137	8,72523158	648,403107	2,73596969	0,42%
Arsénico	As	33	75	42	74,921596	652,566715	8,70088954	657,660741	5,09402566	0,78%
Selenio	Se	34	80	46	79,916522	696,867653	8,71084566	698,15975	1,29209749	0,19%
Bromo	Br	35	79	44	78,918338	686,322206	8,68762286	691,473374	5,15116797	0,75%
Criptón	Kr	36	84	48	83,911507	732,259779	8,71737832	732,666511	0,40673283	0,06%
Rubidio	Rb	37	85	48	84,911789	739,28604	8,69748283	741,701784	2,41574377	0,33%
Estroncio	Sr	38	88	50	87,905614	768,469757	8,73261087	766,389426	-2,08033032	0,27%
Itrio	Y	39	89	50	88,905848	775,54073	8,71394078	774,71729	-0,82344006	0,11%
Zirconio	Zr	40	90	50	89,904704	783,895302	8,7099478	782,145937	-1,74936492	0,22%

Niobio	Nb	41	93	52	92,906378	805,76772	8,66416903	807,012194	1,24447463	0,15%
Molibdeno	Mo	42	98	56	97,905408	846,245805	8,63516127	847,855699	1,60989454	0,19%
Tecnecio	Tc	43	98	55	97,907216	843,779208	8,60999192	847,442279	3,6630714	0,43%
Rutenio	Ru	44	102	58	101,90435	877,952008	8,60737262	879,959852	2,00784483	0,23%
Rodio	Rh	45	103	58	102,905504	884,166006	8,58413598	887,355434	3,18942829	0,36%
Paladio	Pd	46	108	62	107,903894	925,240247	8,56703933	927,362894	2,12264643	0,23%
Plata	Ag	47	107	60	106,905093	915,269532	8,55392086	918,107189	2,83765681	0,31%
Cadmio	Cd	48	114	66	113,903358	972,603006	8,53160532	973,890662	1,28765527	0,13%
Indio	In	49	115	66	114,903878	979,407572	8,51658759	981,856845	2,44927309	0,25%
Estaño	Sn	50	120	70	119,902197	1020,54795	8,50456625	1019,61421	-0,93374402	0,09%
Antimonio	Sb	51	121	70	120,903818	1026,32694	8,48204083	1027,78788	1,4609358	0,14%
Telurio	Te	52	130	78	129,906223	1095,94682	8,43036019	1089,79832	-6,14849926	0,56%
Yodo	I	53	127	74	126,904468	1072,58495	8,44555076	1072,92952	0,34456899	0,03%
Xenón	Xe	54	132	78	131,904154	1112,45197	8,42766645	1108,86694	-3,58502684	0,32%
Cesio	Cs	55	133	78	132,905447	1118,53649	8,41004882	1117,33402	-1,20247245	0,11%
Bario	Ba	56	138	82	137,905241	1158,30292	8,39349939	1152,48121	-5,82170639	0,50%
Lantano	La	57	139	82	138,906348	1164,56069	8,37813449	1161,04452	-3,51617735	0,30%
Cerio	Ce	58	140	82	139,905434	1172,70102	8,37643588	1168,93069	-3,77033667	0,32%
Praseodimio	Pr	59	141	82	140,907648	1177,92764	8,35409672	1176,15079	-1,77685112	0,15%
Neodimio	Nd	60	142	82	141,907719	1185,15044	8,34612989	1182,71559	-2,43485805	0,21%
Prometio	Pm	61	145	84	144,912744	1203,90142	8,30276845	1204,48399	0,58256857	0,05%
Samario	Sm	62	152	90	151,919728	1253,1132	8,24416579	1254,55214	1,43893779	0,11%
Europio	Eu	63	153	90	152,921226	1259,00676	8,22880238	1261,94811	2,94134769	0,23%
Gadolinio	Gd	64	158	94	157,924101	1295,90325	8,20191933	1296,41123	0,50797883	0,04%
Terbio	Tb	65	159	94	158,925343	1302,03528	8,18890114	1303,85841	1,82313181	0,14%
Disprobio	Dy	66	164	98	163,929171	1338,04406	8,15880522	1337,66989	-0,37416271	0,03%
Holmio	Ho	67	165	98	164,930319	1344,26364	8,14705238	1345,14736	0,88372136	0,07%
Erbio	Er	68	166	98	165,93029	1351,5796	8,14204578	1352,02686	0,44726463	0,03%
Tulio	Tm	69	169	100	168,934211	1371,35895	8,11455	1372,46016	1,10121255	0,08%
Iterbio	Yb	70	174	104	173,938858	1406,60483	8,08393581	1405,96591	-0,63892373	0,05%
Lutecio	Lu	71	175	104	174,940768	1412,11462	8,0692264	1412,87519	0,76056872	0,05%
Hafnio	Hf	72	180	108	179,946549	1446,30419	8,03502326	1445,7969	-0,50728389	0,04%
Tantalio	Ta	73	181	108	180,947996	1452,24526	8,02345446	1452,70512	0,45985816	0,03%
Tungsteno	W	74	184	110	183,950933	1472,9412	8,0051152	1472,40644	-0,53475873	0,04%
Renio	Re	75	187	112	186,955751	1491,885	7,97799464	1491,96813	0,08313381	0,01%
Osmio	Os	76	192	116	191,961479	1526,12393	7,94856215	1523,81719	-2,30674164	0,15%
Iridio	Ir	77	193	116	192,962924	1532,06687	7,93817029	1530,68027	-1,38660142	0,09%
Platino	Pt	78	195	117	194,964774	1545,70394	7,92668689	1543,4992	-2,20474565	0,14%
Oro	Au	79	197	118	196,966552	1559,40809	7,91577709	1556,1439	-3,26419012	0,21%
Mercurio	Hg	80	202	122	201,970626	1595,18771	7,89696888	1587,74621	-7,44150812	0,47%
Talio	Tl	81	205	124	204,974412	1615,09282	7,87850154	1606,50716	-8,58565901	0,53%
Plomo	Pb	82	208	126	207,976636	1636,45291	7,86756208	1625,13995	-11,3129607	0,69%
Bismuto	Bi	83	209	126	208,980383	1640,25155	7,84809352	1631,36416	-8,88738633	0,54%
Polonio	Po	84	209	125	208,982416	1637,57536	7,83528882	1630,47426	-7,10110137	0,43%

Astato	At	85	210	125	209,987131	1640,47231	7,81177291	1635,44155	-5,03076502	0,31%
Radón	Rn	86	222	136	222,01757	1708,19288	7,69456251	1709,86939	1,67651766	0,10%
Francio	Fr	87	223	136	223,019731	1713,46886	7,68371687	1716,42503	2,95617369	0,17%
Radio	Ra	88	226	138	226,025403	1731,61716	7,66202285	1734,31414	2,696977	0,16%
Actinio	Ac	89	227	138	227,027747	1736,72268	7,65076073	1740,33765	3,61496254	0,21%
Torio	Th	90	232	142	232,03805	1766,70003	7,61508635	1769,73252	3,03248095	0,17%
Protactinio	Pa	91	231	140	231,035879	1759,86846	7,61847816	1763,56799	3,69953644	0,21%
Uranio	U	92	238	146	238,050783	1801,7028	7,57017981	1804,67709	2,97429905	0,17%

Abreviaturas y Datos: Z: Número atómico; A: Número másico; N: Número de neutrones; MA: Masa atómica; E_b : Energía de Enlace Nuclear (Ecuación 1); E_{bt} : Energía de Enlace Total por partícula, de la fórmula semiempírica de Weizsächer (Ecuación 2); E_b/A : Energía de Enlace con respecto a la cantidad de partículas en el núcleo; $E_{bt} - E_b$: Diferencia entre las Energías de Enlace nuclear; y $|E_{bt} - E_b|/E_b$: Diferencia porcentual entre las Energías de enlace nuclear.

Partiendo de los datos obtenidos y presentados en la Tabla 1, se grafica la Energía de Enlace Nuclear (E_b) con respecto a su Números de Masa Atómica (A), se obtiene la Figura 1:

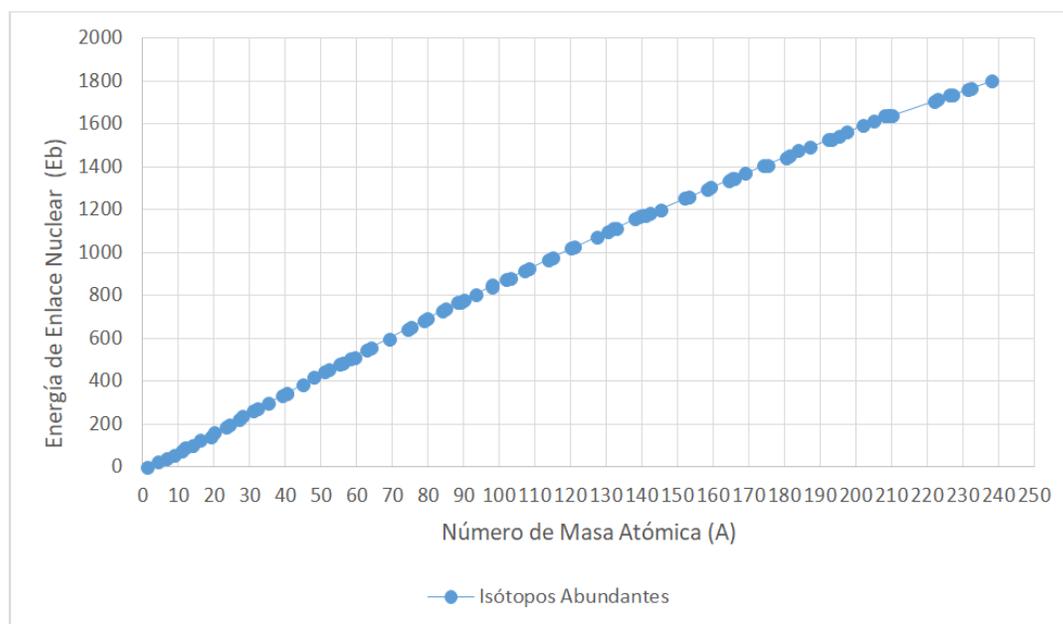


Figura 1: Gráfica Energía de Enlace Nuclear (E_b) Vs Número de Masa Atómica (A) de Isótopos Abundantes.

Se aprecia en la gráfica un aumento proporcional de la Energía de Enlace Nuclear con respecto a los Números de Masa Atómica (A) de los Isótopos más abundantes en la naturaleza de cada elemento químico. Lo que indica que, a mayor número atómico, se presenta una mayor Energía de Enlace en el núcleo atómico, con una leve disminución para los elementos más pesados.

Al calcular la Energía de Enlace con respecto a la cantidad de partículas (protones y neutrones) presentes en cada núcleo (A), E_b/A para cada isótopo abundante de los 92 elementos químicos estables, se aprecia un cambio no uniforme en la Energía de Enlace por partícula o nucleón, como se puede observar en la Figura 2.

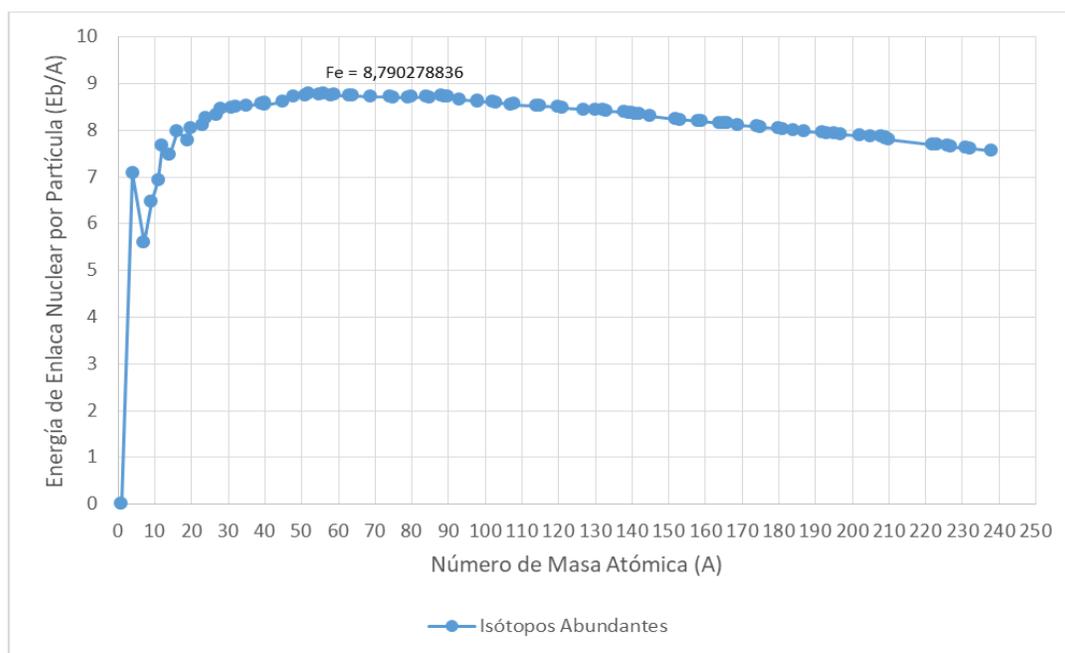


Figura 2: Gráfica Energía de Enlace Nuclear por Partícula (E_b/A) Vs Número de Masa Atómica (A) de Isótopos Abundantes.

Para elementos livianos con valores de A menores a 50, se presenta una variación en la Energía de Enlace por partícula, más marcada, que aumenta a medida que es mayor su número A; al llegar al rango de A entre 50 y 60, se aprecia una reducción en el incremento de la Energía de Enlace, llegando a un máximo, más específicamente en $A = 56$, donde el isótopo más representativo es el Hierro-56 (^{56}Fe).

Para elementos más pesados que el Hierro-56 (^{56}Fe) hasta el Uranio-238 (^{238}U), se aprecia una disminución de la Energía de Enlace Nuclear por nucleón conforme aumentan sus Números de Masa Atómica (A), con la particularidad de presentar un gran aumento en la cantidad de neutrones con respecto a la de protones.

Con respecto a lo anterior y verificar que los cálculos realizados de la Energías de Enlace Nuclear (E_b), según la Ecuación 1, son adecuados; se procede a realizar una comparación con los valores de las Energías de Enlace Total (E_{bt}), obtenidos con la Ecuación 2 y registrados en la Tabla 1, elaborando una gráfica donde se relaciona la diferencia porcentual entre las Energías de Enlace Nuclear Total (E_{bt}) según el modelo de la Gota de Agua (Ecuación 2) y la Energía de Enlace Nuclear (E_b) calculada de la masa medida de los núcleos más abundante (Ecuación 1), representado como: $|E_{bt} - E_b| / E_b$, con respecto a los Números de Masa Atómica (A) de los isótopos; tal como se muestra en la Figura 3 a continuación.

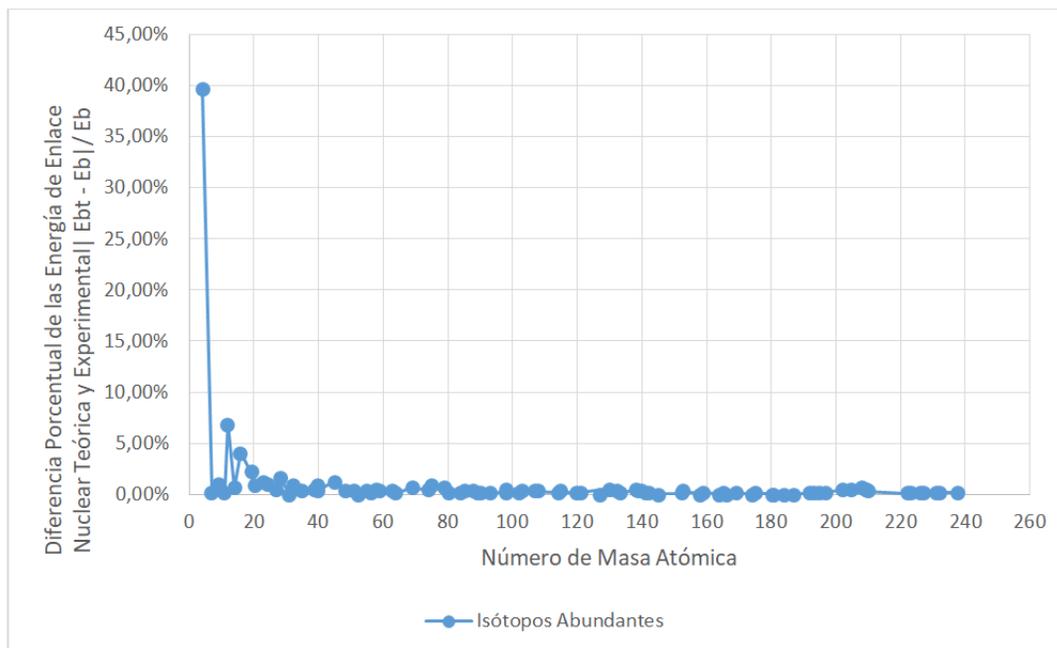


Figura 3: Gráfica Diferencia Porcentual de las Energía de Enlace Nuclear Teórica y Experimental ($|E_b_t - E_b|/E_b$) Vs Número de Masa Atómica (A) de Isótopos Abundantes.

Se encuentra que, la diferencia porcentual entre sus valores energéticos, son bajos, en especial para isótopos más pesados con $A > 20$; pero para isótopos con $A < 20$, presenta una mayor diferencia entre sus valores de energía. Se deduce por lo tanto que el cálculo teórico de la Energía de Enlace Nuclear a través del modelo de la “gota de agua” (Ecuación 2), presenta una adecuada aproximación al cálculo experimental de la Energía de Enlace Nuclear (Ecuación 1).

De acuerdo con lo anterior, se elabora una Gráfica de E_b_t vs A (Ver Figura 4), para todos los isotopos de los elementos químicos desde el Hidrógeno-1 ($A = 1$) hasta el Uranio-238 ($A = 238$); de la cual se aprecia un aumento progresivo en la Energía de Enlace Nuclear a medida que aumenta el número de masa atómica (A) de los isótopos, pero donde dicho crecimiento no es lineal.

Si dicha Gráfica, se relaciona con los resultados observados en la Figura 1, para el cual se traza una línea de tendencia a partir de los primeros isótopos abundantes desde $A = 1$ hasta $A = 15$ y se extrapola hasta el isótopo con $A = 238$, se aprecia con mayor claridad la desviación en la tendencia del aumento de la Energía de Enlace Nuclear, lo que se relaciona con el efecto del aumento excesivo de neutrones en los núcleos atómicos, el efecto del volumen del núcleo atómico, el efecto de la superficie y el efecto de la repulsión de Coulomb, que afectan considerablemente dicha energía a medida que el número de masa atómica aumente, en especial en los elementos más pesados, como se aprecia en la Figura 4, que se presenta a continuación:

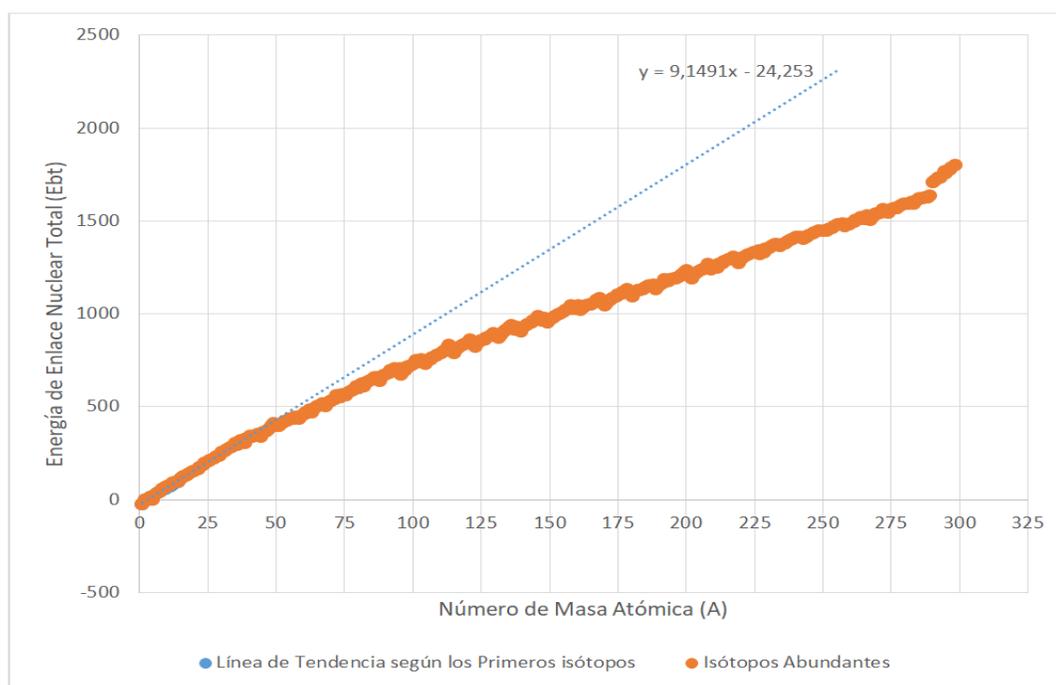


Figura 4: Gráfica de Comparación de la Tendencia en las Energías de Enlace Nuclear Total Vs Número de Masa Atómica (A) de Isótopos Abundantes.

De acuerdo con la Figura 4, se puede recalcular la Energía de Enlace con respecto al ajuste Lineal (Ebl), teniendo en cuenta los isótopos de cada elemento químico, obteniéndose los datos registrados en la Tabla 2.

Tabla 2: *Energía de enlace nuclear para los isótopos estables de los elementos químicos y ajuste lineal de la energía de enlace.*

ISÓTOPOS MAS ABUNDANTES DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS							
Nombre	Símbolo	Z	A	N	Ebt	EbL	Ebt/A
Hidrógeno	H	1	1	0	-25,7	-15,1039	-25,7
Hidrógeno	H	1	2	1	3,14426127	-5,9548	1,57213064
Hidrógeno	H	1	3	2	2,20784128	3,1943	0,73594709
Helio	He	2	4	2	17,0522667	12,3434	4,26306667
Helio	He	2	3	1	1,22326827	3,1943	0,40775609
Litio	Li	3	6	3	33,0813266	30,6416	5,51355444
Litio	Li	3	7	4	39,1659809	39,7907	5,59514013
Berilio	Be	4	9	5	57,5656619	58,0889	6,39618466
Boro	B	5	10	5	67,7886626	67,238	6,77886626
Boro	B	5	11	6	76,1292397	76,3871	6,92083997
Carbono	C	6	12	6	85,7979744	85,5362	7,1498312
Carbono	C	6	13	7	94,8137388	94,6853	7,29336452
Carbono	C	6	14	8	100,823104	103,8344	7,2016503
Nitrógeno	N	7	14	7	104,0309	103,8344	7,4307786
Nitrógeno	N	7	15	8	113,572054	112,9835	7,57147024
Oxígeno	O	8	16	8	122,398279	122,1326	7,64989242
Oxígeno	O	8	17	9	132,364154	131,2817	7,78612671
Oxígeno	O	8	18	10	139,928795	140,4308	7,77382195
Flúor	F	9	19	10	151,15782	149,5799	7,95567474
Neón	Ne	10	20	10	159,307517	158,729	7,96537587
Neón	Ne	10	21	11	169,927394	167,8781	8,09178067
Neón	Ne	10	22	12	178,548917	177,0272	8,11585988
Sodio	Na	11	23	12	188,652393	186,1763	8,20227796
Magnesio	Mg	12	24	12	196,207122	195,3254	8,17529677
Magnesio	Mg	12	25	13	207,316352	204,4745	8,29265406
Magnesio	Mg	12	26	14	216,714129	213,6236	8,33515881
Aluminio	Al	13	27	14	225,905926	222,7727	8,36688615
Silicio	Si	14	28	14	232,914141	231,9218	8,31836218
Silicio	Si	14	29	15	244,410216	241,0709	8,4279385
Silicio	Si	14	30	16	254,409377	250,22	8,48031256
Fósforo	P	15	31	16	262,820254	259,3691	8,47807271
Azufre	S	16	32	16	269,314606	268,5182	8,41608143
Azufre	S	16	33	17	281,128609	277,6673	8,51904875
Azufre	S	16	34	18	291,612128	286,8164	8,57682731
Azufre	S	16	36	20	309,036407	305,1146	8,58434464
Cloro	Cl	17	35	18	299,329091	295,9655	8,55225973
Cloro	Cl	17	37	20	319,558231	314,2637	8,63670894
Argón	Ar	18	36	18	305,333584	305,1146	8,48148844
Argón	Ar	18	38	20	328,301828	323,4128	8,6395218

Argón	Ar	18	40	22	346,842728	341,711	8,67106819
Potasio	K	19	39	20	335,386533	332,5619	8,59965469
Potasio	K	19	40	21	346,448938	341,711	8,66122346
Potasio	K	19	41	22	356,454917	350,8601	8,69402237
Calcio	Ca	20	40	20	340,919938	341,711	8,52299846
Calcio	Ca	20	42	22	364,461874	360,0092	8,67766367
Calcio	Ca	20	43	23	374,675915	369,1583	8,71339337
Calcio	Ca	20	44	24	383,947331	378,3074	8,72607572
Calcio	Ca	20	46	26	399,910882	396,6056	8,69371484
Calcio	Ca	20	48	28	412,797782	414,9038	8,5999538
Escandio	Sc	21	45	24	392,746271	387,4565	8,72769492
Titanio	Ti	22	46	24	400,079538	396,6056	8,69738125
Titanio	Ti	22	47	25	410,666491	405,7547	8,73758491
Titanio	Ti	22	48	26	420,377932	414,9038	8,75787358
Titanio	Ti	22	49	27	429,268003	424,0529	8,76057149
Titanio	Ti	22	50	28	437,386505	433,202	8,74773011
Vanadio	V	23	50	27	438,346665	433,202	8,7669333
Vanadio	V	23	51	28	447,461157	442,3511	8,77374817
Cromo	Cr	24	50	26	435,145377	433,202	8,70290754
Cromo	Cr	24	52	28	456,153582	451,5002	8,77218427
Cromo	Cr	24	53	29	465,478463	460,6493	8,78261251
Cromo	Cr	24	54	30	474,075981	469,7984	8,77918484
Manganeso	Mn	25	55	30	483,322934	478,9475	8,78768971
Hierro	Fe	26	54	28	469,652606	469,7984	8,69727048
Hierro	Fe	26	56	30	491,288177	488,0966	8,77300317
Hierro	Fe	26	57	31	500,997202	497,2457	8,7894246
Hierro	Fe	26	58	32	510,018475	506,3948	8,79342198
Cobalto	Co	27	59	32	518,50359	515,5439	8,78819643
Níquel	Ni	28	58	30	503,59654	506,3948	8,68269897
Níquel	Ni	28	60	32	525,792425	524,693	8,76320708
Níquel	Ni	28	61	33	535,844162	533,8421	8,78433053
Níquel	Ni	28	62	34	545,243787	542,9912	8,79425463
Níquel	Ni	28	64	36	562,21	561,2894	8,78453125
Cobre	Cu	29	63	34	553,020774	552,1403	8,77810753
Cobre	Cu	29	65	36	571,563188	570,4385	8,79327981
Cinc	Zn	30	64	34	559,675	561,2894	8,74492188
Cinc	Zn	30	66	36	579,775296	579,5876	8,78447418
Cinc	Zn	30	67	37	588,923553	588,7367	8,78990378
Cinc	Zn	30	68	38	597,506199	597,8858	8,78685586
Cinc	Zn	30	70	40	613,072421	616,184	8,75817744
Galio	Ga	31	69	38	606,106679	607,0349	8,78415477
Galio	Ga	31	71	40	623,109385	625,3331	8,77618852
Germanio	Ge	32	70	38	613,631848	616,184	8,76616926
Germanio	Ge	32	72	40	632,056844	634,4822	8,77856728

Germanio	Ge	32	73	41	640,479055	643,6313	8,77368568
Germanio	Ge	32	74	42	648,403107	652,7804	8,76220414
Germanio	Ge	32	76	44	662,836034	671,0786	8,72152676
Arsénico	As	33	75	42	657,660741	661,9295	8,76880988
Selenio	Se	34	74	40	646,829019	652,7804	8,74093269
Selenio	Se	34	76	42	665,887808	671,0786	8,76168168
Selenio	Se	34	77	43	674,657819	680,2277	8,76178985
Selenio	Se	34	78	44	682,947721	689,3768	8,75574001
Selenio	Se	34	80	46	698,15975	707,675	8,72699688
Selenio	Se	34	82	48	711,660145	725,9732	8,67878226
Bromo	Br	35	79	44	691,473374	698,5259	8,75282752
Bromo	Br	35	81	46	707,942604	716,8241	8,74003214
Criptón	Kr	36	78	42	679,379966	689,3768	8,70999956
Criptón	Kr	36	80	44	699,020607	707,675	8,73775758
Criptón	Kr	36	82	46	716,736664	725,9732	8,74069103
Criptón	Kr	36	83	47	724,916737	735,1223	8,73393659
Criptón	Kr	36	84	48	732,666511	744,2714	8,72222037
Criptón	Kr	36	86	50	746,935641	762,5696	8,68529815
Rubidio	Rb	37	85	48	741,701784	753,4205	8,72590334
Rubidio	Rb	37	87	50	757,137524	771,7187	8,70273016
Estroncio	Sr	38	84	46	731,473437	744,2714	8,7080171
Estroncio	Sr	38	86	48	749,795485	762,5696	8,71855215
Estroncio	Sr	38	87	49	758,300973	771,7187	8,71610313
Estroncio	Sr	38	88	50	766,389426	780,8678	8,70897075
Itrio	Y	39	89	50	774,71729	790,0169	8,70468865
Zirconio	Zr	40	90	50	782,145937	799,166	8,69051041
Zirconio	Zr	40	91	51	790,953505	808,3151	8,69179676
Zirconio	Zr	40	92	52	799,356607	817,4642	8,68865877
Zirconio	Zr	40	94	54	815,001356	835,7624	8,67022719
Zirconio	Zr	40	96	56	829,178661	854,0606	8,63727772
Niobio	Nb	41	93	52	807,012194	826,6133	8,67755048
Molibdeno	Mo	42	92	50	794,399637	817,4642	8,63477866
Molibdeno	Mo	42	94	52	813,806772	835,7624	8,65751885
Molibdeno	Mo	42	95	53	822,89576	844,9115	8,66206063
Molibdeno	Mo	42	96	54	831,592189	854,0606	8,66241863
Molibdeno	Mo	42	97	55	839,908265	863,2097	8,6588481
Molibdeno	Mo	42	98	56	847,855699	872,3588	8,65158877
Molibdeno	Mo	42	100	58	862,689131	890,657	8,62689131
Tecnecio	Tc	43	98	55	847,442279	872,3588	8,6473702
Rutenio	Ru	44	96	52	824,898565	854,0606	8,59269338
Rutenio	Ru	44	98	54	844,794332	872,3588	8,62035032
Rutenio	Ru	44	99	55	854,146356	881,5079	8,62774097
Rutenio	Ru	44	100	56	863,117104	890,657	8,63117104
Rutenio	Ru	44	101	57	871,717959	899,8061	8,63087088

Rutenio	Ru	44	102	58	879,959852	908,9552	8,62705738
Rutenio	Ru	44	104	60	895,408395	927,2534	8,60969611
Rodio	Rh	45	103	58	887,355434	918,1043	8,6151013
Paladio	Pd	46	102	56	875,123007	908,9552	8,57963732
Paladio	Pd	46	104	58	893,949682	927,2534	8,59567002
Paladio	Pd	46	105	59	902,817788	936,4025	8,59826465
Paladio	Pd	46	106	60	911,336186	945,5516	8,59751118
Paladio	Pd	46	108	62	927,362894	963,8498	8,58669346
Paladio	Pd	46	110	64	942,104338	982,148	8,56458489
Plata	Ag	47	107	60	918,107189	954,7007	8,58044102
Plata	Ag	47	109	62	935,072444	972,9989	8,57864628
Cadmio	Cd	48	106	58	904,805586	945,5516	8,53590175
Cadmio	Cd	48	108	60	924,106105	963,8498	8,55653801
Cadmio	Cd	48	110	62	942,004388	982,148	8,56367626
Cadmio	Cd	48	111	63	950,451474	991,2971	8,56262589
Cadmio	Cd	48	112	64	958,575862	1000,4462	8,55871305
Cadmio	Cd	48	113	65	966,386156	1009,5953	8,55208988
Cadmio	Cd	48	114	66	973,890662	1018,7444	8,54290054
Cadmio	Cd	48	116	68	988,014091	1037,0426	8,51736285
Indio	In	49	113	64	965,654119	1009,5953	8,54561167
Indio	In	49	115	66	981,856845	1027,8935	8,53788561
Estaño	Sn	50	112	62	953,600785	1000,4462	8,51429272
Estaño	Sn	50	114	64	971,981923	1018,7444	8,52615722
Estaño	Sn	50	115	65	980,682554	1027,8935	8,52767438
Estaño	Sn	50	116	66	989,067865	1037,0426	8,52644711
Estaño	Sn	50	117	67	997,145973	1046,1917	8,52261516
Estaño	Sn	50	118	68	1004,92472	1055,3408	8,51631121
Estaño	Sn	50	119	69	1012,41169	1064,4899	8,50766127
Estaño	Sn	50	120	70	1019,61421	1073,639	8,49678505
Estaño	Sn	50	122	72	1033,19398	1091,9372	8,46880311
Estaño	Sn	50	124	74	1045,71799	1110,2354	8,4332096
Antimonio	Sb	51	121	70	1027,78788	1082,7881	8,49411468
Antimonio	Sb	51	123	72	1042,19272	1101,0863	8,47311156
Telurio	Te	52	120	68	1018,85723	1073,639	8,49047688
Telurio	Te	52	122	70	1035,22759	1091,9372	8,48547201
Telurio	Te	52	123	71	1042,98023	1101,0863	8,47951409
Telurio	Te	52	124	72	1050,45386	1110,2354	8,47140212
Telurio	Te	52	125	73	1057,6552	1119,3845	8,4612416
Telurio	Te	52	126	74	1064,59075	1128,5336	8,44913296
Telurio	Te	52	128	76	1077,68953	1146,8318	8,41944947
Telurio	Te	52	130	78	1089,79832	1165,13	8,38306404
Yodo	I	53	127	74	1072,92952	1137,6827	8,44826391
Xenón	Xe	54	124	70	1047,96037	1110,2354	8,45129329
Xenón	Xe	54	126	72	1064,81811	1128,5336	8,45093734

Xenón	Xe	54	128	74	1080,55434	1146,8318	8,44183082
Xenón	Xe	54	129	75	1088,01826	1155,9809	8,43425007
Xenón	Xe	54	130	76	1095,22103	1165,13	8,42477712
Xenón	Xe	54	131	77	1102,16865	1174,2791	8,41350113
Xenón	Xe	54	132	78	1108,86694	1183,4282	8,40050716
Xenón	Xe	54	134	80	1121,53799	1201,7264	8,36968646
Xenón	Xe	54	136	82	1133,27734	1220,0246	8,3329216
Cesio	Cs	55	133	78	1117,33402	1192,5773	8,40100767
Bario	Ba	56	130	74	1093,71325	1165,13	8,41317886
Bario	Ba	56	132	76	1109,93478	1183,4282	8,40859683
Bario	Ba	56	134	78	1125,10608	1201,7264	8,39631402
Bario	Ba	56	135	79	1132,31252	1210,8755	8,38750016
Bario	Ba	56	136	80	1139,27362	1220,0246	8,37701194
Bario	Ba	56	137	81	1145,99477	1229,1737	8,36492536
Bario	Ba	56	138	82	1152,48121	1238,3228	8,35131311
Lantano	La	57	138	81	1154,19462	1238,3228	8,36372911
Lantano	La	57	139	82	1161,04452	1247,4719	8,35283825
Cerio	Ce	58	136	78	1138,61246	1220,0246	8,37215045
Cerio	Ce	58	138	80	1154,26512	1238,3228	8,36424002
Cerio	Ce	58	140	82	1168,93069	1256,621	8,3495049
Cerio	Ce	58	142	84	1182,65098	1274,9192	8,32852806
Praseodimio	Pr	59	141	82	1176,15079	1265,7701	8,34149494
Neodimio	Nd	60	142	82	1182,71559	1274,9192	8,328983
Neodimio	Nd	60	143	83	1190,40523	1284,0683	8,32451212
Neodimio	Nd	60	144	84	1197,85728	1293,2174	8,31845333
Neodimio	Nd	60	145	85	1205,07665	1302,3665	8,31087348
Neodimio	Nd	60	146	86	1212,06815	1311,5156	8,30183665
Neodimio	Nd	60	148	88	1225,38604	1329,8138	8,2796354
Neodimio	Nd	60	150	90	1237,84677	1348,112	8,2523118
Prometio	Pm	61	145	84	1204,48399	1302,3665	8,30678616
Samario	Sm	62	144	82	1193,92092	1293,2174	8,29111753
Samario	Sm	62	147	85	1218,38901	1320,6647	8,28836061
Samario	Sm	62	148	86	1226,07083	1329,8138	8,28426237
Samario	Sm	62	149	87	1233,52352	1338,9629	8,27868135
Samario	Sm	62	150	88	1240,75167	1348,112	8,27167783
Samario	Sm	62	152	90	1254,55214	1366,4102	8,25363249
Samario	Sm	62	154	92	1267,50661	1384,7084	8,23056238
Europio	Eu	63	151	88	1247,48096	1357,2611	8,26146333
Europio	Eu	63	153	90	1261,94811	1375,5593	8,24802688
Gadolinio	Gd	64	152	88	1253,58726	1366,4102	8,24728463
Gadolinio	Gd	64	154	90	1268,71888	1384,7084	8,23843427
Gadolinio	Gd	64	155	91	1275,95709	1393,8575	8,23198125
Gadolinio	Gd	64	156	92	1282,98252	1403,0066	8,22424695
Gadolinio	Gd	64	157	93	1289,79925	1412,1557	8,21528183

Gadolinio	Gd	64	158	94	1296,41123	1421,3048	8,20513438
Gadolinio	Gd	64	160	96	1309,03638	1439,603	8,18147739
Terbio	Tb	65	159	94	1303,85841	1430,4539	8,20036737
Disprosio	Dy	66	156	90	1280,42118	1403,0066	8,2078281
Disprosio	Dy	66	158	92	1295,98564	1421,3048	8,20244076
Disprosio	Dy	66	160	94	1310,69434	1439,603	8,19183961
Disprosio	Dy	66	161	95	1317,73776	1448,7521	8,18470657
Disprosio	Dy	66	162	96	1324,57902	1457,9012	8,17641371
Disprosio	Dy	66	163	97	1331,22185	1467,0503	8,16700524
Disprosio	Dy	66	164	98	1337,66989	1476,1994	8,15652374
Holmio	Ho	67	165	98	1345,14736	1485,3485	8,15240827
Erbio	Er	68	162	94	1322,56657	1457,9012	8,16399114
Erbio	Er	68	164	96	1337,70333	1476,1994	8,15672763
Erbio	Er	68	166	98	1352,02686	1494,4976	8,14474014
Erbio	Er	68	167	99	1358,89281	1503,6467	8,1370827
Erbio	Er	68	168	100	1365,56625	1512,7958	8,12837052
Erbio	Er	68	170	102	1378,3492	1531,094	8,10793647
Tulio	Tm	69	169	100	1372,46016	1521,9449	8,12106605
Iterbio	Yb	70	168	98	1364,02404	1512,7958	8,11919069
Iterbio	Yb	70	170	100	1378,77033	1531,094	8,11041373
Iterbio	Yb	70	171	101	1385,85131	1540,2431	8,10439364
Iterbio	Yb	70	172	102	1392,74204	1549,3922	8,09733747
Iterbio	Yb	70	173	103	1399,44583	1558,5413	8,08928227
Iterbio	Yb	70	174	104	1405,96591	1567,6904	8,08026383
Iterbio	Yb	70	176	106	1418,46745	1585,9886	8,05947416
Lutecio	Lu	71	175	104	1412,87519	1576,8395	8,0735725
Lutecio	Lu	71	176	105	1419,5031	1585,9886	8,06535851
Hafnio	Hf	72	174	102	1404,82383	1567,6904	8,07370017
Hafnio	Hf	72	176	104	1419,21263	1585,9886	8,06370812
Hafnio	Hf	72	177	105	1426,12821	1595,1377	8,05722154
Hafnio	Hf	72	178	106	1432,8621	1604,2868	8,04978706
Hafnio	Hf	72	179	107	1439,41733	1613,4359	8,04143762
Hafnio	Hf	72	180	108	1445,7969	1622,585	8,03220501
Tantalio	Ta	73	180	107	1446,04476	1622,585	8,03358198
Tantalio	Ta	73	181	108	1452,70512	1631,7341	8,02599511
Tungsteno	W	74	180	106	1444,99222	1622,585	8,02773458
Tungsteno	W	74	182	108	1459,05286	1640,8832	8,01677393
Tungsteno	W	74	183	109	1465,81658	1650,0323	8,00992666
Tungsteno	W	74	184	110	1472,40644	1659,1814	8,00220891
Tungsteno	W	74	186	112	1485,0758	1677,4796	7,98427848
Renio	Re	75	185	110	1478,75349	1668,3305	7,99326212
Renio	Re	75	187	112	1491,96813	1686,6287	7,9784392
Osmio	Os	76	184	108	1470,09405	1659,1814	7,98964156
Osmio	Os	76	186	110	1484,5522	1677,4796	7,98146342

Osmio	Os	76	187	111	1491,51756	1686,6287	7,97602973
Osmio	Os	76	188	112	1498,31086	1695,7778	7,96973861
Osmio	Os	76	189	113	1504,93482	1704,9269	7,96261812
Osmio	Os	76	190	114	1511,39213	1714,076	7,95469543
Osmio	Os	76	192	116	1523,81719	1732,3742	7,93654787
Iridio	Ir	77	191	114	1517,72707	1723,2251	7,94621504
Iridio	Ir	77	193	116	1530,68027	1741,5233	7,93098583
Platino	Pt	78	190	112	1509,37317	1714,076	7,94406929
Platino	Pt	78	192	114	1523,52394	1732,3742	7,93502052
Platino	Pt	78	194	116	1537,00413	1750,6724	7,92270168
Platino	Pt	78	195	117	1543,4992	1759,8215	7,9153805
Platino	Pt	78	196	118	1549,83425	1768,9706	7,90731762
Platino	Pt	78	198	120	1562,03403	1787,2688	7,88906074
Oro	Au	79	197	118	1556,1439	1778,1197	7,8992076
Mercurio	Hg	80	196	116	1548,05854	1768,9706	7,89825787
Mercurio	Hg	80	198	118	1561,92531	1787,2688	7,88851166
Mercurio	Hg	80	199	119	1568,61601	1796,4179	7,88249251
Mercurio	Hg	80	200	120	1575,14816	1805,567	7,87574078
Mercurio	Hg	80	201	121	1581,52412	1814,7161	7,86827918
Mercurio	Hg	80	202	122	1587,74621	1823,8652	7,86012974
Mercurio	Hg	80	204	124	1599,73784	1842,1634	7,84185214
Talio	Tl	81	203	122	1594,01858	1833,0143	7,85230827
Talio	Tl	81	205	124	1606,50716	1851,3125	7,83662028
Plomo	Pb	82	204	122	1599,77216	1842,1634	7,84202037
Plomo	Pb	82	206	124	1612,75675	1860,4616	7,82891624
Plomo	Pb	82	207	125	1619,02243	1869,6107	7,82136441
Plomo	Pb	82	208	126	1625,13995	1878,7598	7,81317284
Bismuto	Bi	83	209	126	1631,36416	1887,9089	7,80557014
Polonio	Po	84	209	125	1630,47426	1887,9089	7,80131226
Astato	At	85	210	125	1635,44155	1897,058	7,78781688
Radón	Rn	86	222	136	1709,86939	2006,8472	7,70211439
Francio	Fr	87	223	136	1716,42503	2015,9963	7,69697325
Radio	Ra	88	226	138	1734,31414	2043,4436	7,67395638
Actinio	Ac	89	227	138	1740,33765	2052,5927	7,66668567
Torio	Th	90	232	142	1769,73252	2098,3382	7,62815739
Protactinio	Pa	91	231	140	1763,56799	2089,1891	7,63449347
Uranio	U	92	234	142	1781,13647	2116,6364	7,6116943
Uranio	U	92	235	143	1787,21225	2125,7855	7,60515851
Uranio	U	92	238	146	1804,67709	2153,2328	7,58267687

Abreviaturas: Z: Número atómico; A: Número másico; N: Número de neutrones; Ebt: Energía de enlace total por partícula, de la fórmula semiempírica de Weizsäcker; y Ebl: Energía de enlace por partícula, con el ajuste lineal.

La variación de la Energía de Enlace Nuclear a través de los 92 elementos químicos estables permite visualizar que, en la formación de éstos en el Universo se presentan diferentes procesos de fusión nuclear con condiciones energéticas diferentes, lo que se encuentra directamente relacionado con los procesos termonucleares y ciclos de vida en las estrellas. El Hierro al presentar una máxima energía de enlace nuclear con respecto a la que presentan los demás elementos químicos, se convierte en el elemento clave en la estabilidad energética de las estrellas y en el proceso de nucleosíntesis de los elementos químicos.

Para comprender el proceso de fusión nuclear, se debe tener en cuenta que existe una relación entre la masa y la energía de los núcleos y nucleones, antes y después de la fusión y en la energía que absorben y emiten en dicho proceso.

Si se asume un núcleo atómico de un elemento químico cualquiera de Masa M y Número Másico A , que se representará como M_A ; y otro núcleo atómico de un elemento que se forma a partir del elemento inicial al cual se le ha adicionado una partícula (protón o neutrón) por fusión, quedando la Masa con número másico $A+1$, representándose como M_{A+1} .

Ahora, en el proceso de fusión nuclear se ha encontrado que, la masa de las partículas sin fusionarse es diferente a la masa del núcleo fusionado, donde la diferencia entre dichas masas es equivalente a la energía que se libera o se absorbe durante la fusión. Esto se puede representar y entender matemáticamente con la siguiente expresión:

$$M_A + 1p^+ = M_{A+1} + \text{Energía} \quad (3)$$

$$\text{Energía} = M_A - M_{A+1} + 1p^+ \quad (4)$$

En cuanto a las Energías de Enlace Nuclear por partícula (E_b/A), para el elemento M_A , se representa como E_b/A y para el elemento M_{A+1} , queda como $E_b/A+1$. Relacionando estos términos con la diferencia de masa $M_A - M_{A+1}$, de la ecuación (4), se obtiene:

$$M_A - M_{A+1} \approx [E_b/A+1] A+1 - (E_b/A) A \quad (5)$$

$$\text{Llamando } U_{A+1} = E_b/A+1 \quad \text{y} \quad U_A = E_b/A$$

$$M_A - M_{A+1} = (U_{A+1} - U_A) A + U_{A+1} \quad (6)$$

De acuerdo con la Ecuación 6, analizando las Energías U_{A+1} y U_A , pueden suceder dos eventos:

- Si, $U_{A+1} > U_A$, entonces $M_A - M_{A+1} > 0$, indica que en el proceso se libera energía, presentándose una fusión exotérmica, que se produce espontáneamente, lo cual, representado gráficamente, tiene una tendencia ascendente como se muestra a continuación en la Figura 5.

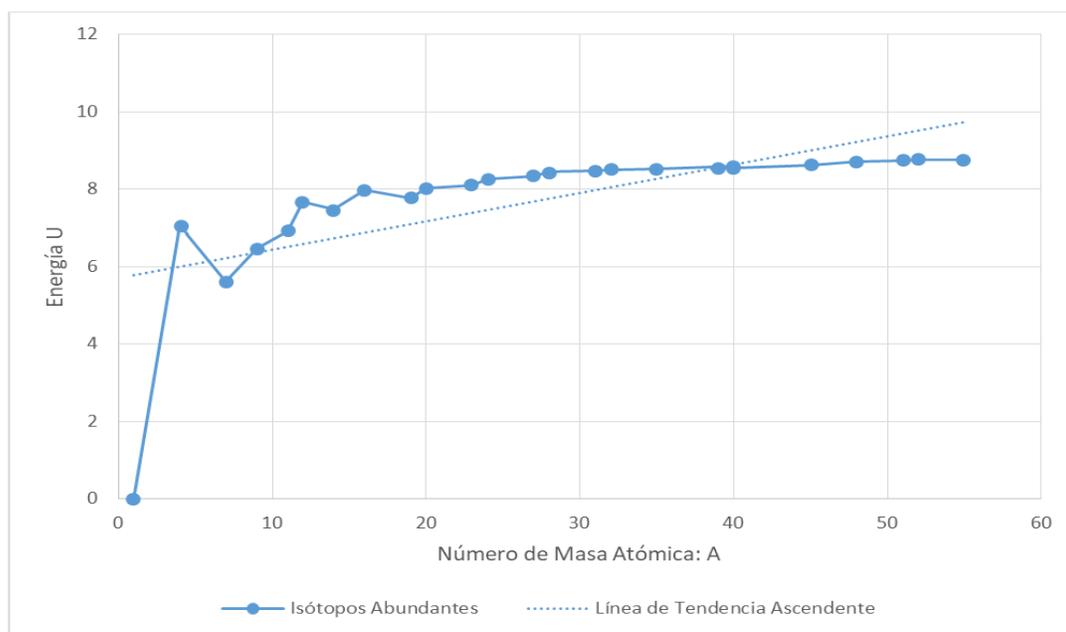


Figura 5: Gráfica Energía U Vs Número de Masa Atómica (A), para $A < 56$.

- Si, $U_{A+1} < U_A$, entonces $M_A - M_{A+1} > 0$, indica que en el proceso se absorbe energía, presentándose una fusión endotérmica, que no se produce espontáneamente, lo cual, representado gráficamente, tiene una tendencia descendente como se muestra en la Figura 6.

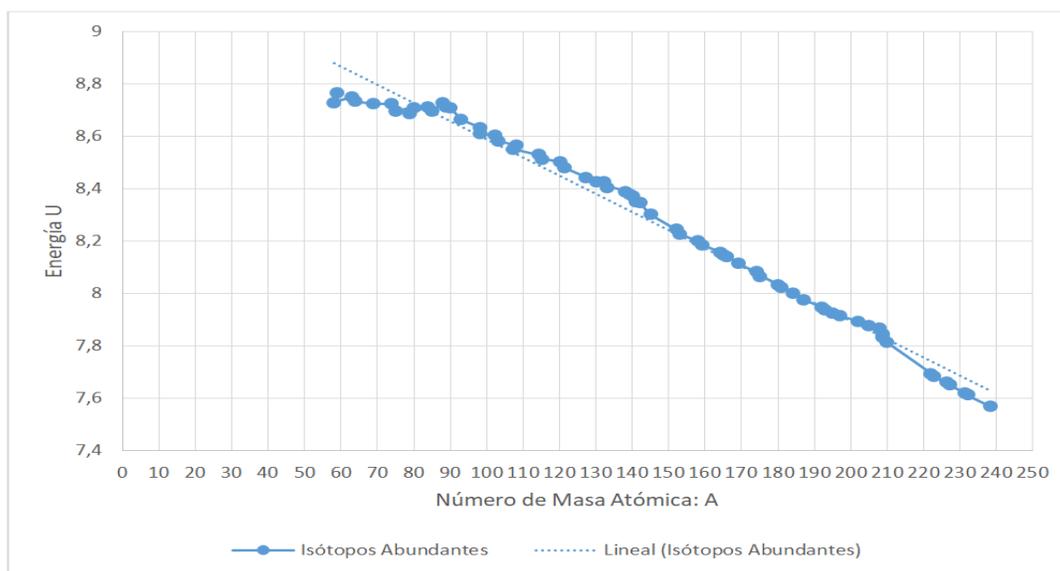


Figura 6: Gráfica Energía U Vs Número de Masa Atómica (A) para $A > 56$.

Ahora, si se retoman las Figuras 5 y 6, con referencia a las anteriores anotaciones, se encuentra que, en los isótopos entre $A = 1$ y $A = 50$, el proceso energético en la fusión nuclear es exotérmico, puesto que a medida que se incrementa el número de partículas en el núcleo, hay una mayor energía de enlace por nucleón, lo que indica que, en dicho proceso de fusión, se libera energía considerablemente. En el rango entre $A = 50$ y $A = 56$, se llega a un punto de estabilidad energética, donde el requerimiento de esta no aumenta considerablemente hasta $A = 56$, para isótopos como Manganeseo-55 (^{55}Mn), Hierro-56 (^{56}Fe) y Niquel-58 (^{58}Ni), donde aún se presenta proceso exotérmico de fusión nuclear. En la Figura 6, para el rango de $A = 57$ hasta $A = 238$, se inicia una disminución en la Energía de Enlace Nuclear por nucleón, presentándose a su vez, un proceso energético de fusión nuclear endotérmico, requiriéndose por tanto cada vez más energía

para lograr la adición de nuevas partículas al núcleo, esto hace que se absorba energía en dicho proceso, lo que no ocurre espontáneamente.

Con lo anterior se comprende cómo en el proceso de nucleosíntesis estelar, en el interior de las estrellas se fusionan núcleos de elementos químicos hasta el Hierro-56 (^{56}Fe) e isótopos cercanos, con alta liberación de energía; en dicho proceso el ^{56}Fe , se convierte en el elemento límite de este proceso en el interior de las estrellas masivas, durante su ciclo de vida. Con la producción de los isótopos con $A = 56$, la estrella comienza a disminuir sus reacciones termonucleares en el interior y por consiguiente la disminución de su temperatura y presión interna, sin permitir que se sigan fusionando núcleos más pesados (puesto que requieren más energía), lo que conduce a la estrella a entrar en un colapso de las capas externas del núcleo, lo que finalmente la llevará a estallar como una Supernova tipo II.

3.1.4. Procesos de nucleosíntesis

La Nucleosíntesis, es el proceso a través del cual se originan o forman los Núcleos Atómicos de los elementos químicos por medio de la fusión entre las partículas subatómicas de protones y neutrones, o entre núcleos de elementos más livianos para formar otros más pesados. Se conoce que todos los elementos químicos tienen su origen a través de diferentes procesos de nucleosíntesis, donde la formación de núcleos livianos presenta condiciones de temperatura, energía y densidades, diferentes a las que requieren la formación de los núcleos más pesados. Y es debido a esto que, se distinguen básicamente cuatro tipos de Nucleosíntesis: La Nucleosíntesis

Primordial o Primigenia, la Nucleosíntesis Estelar, la Nucleosíntesis Explosiva y la Nucleosíntesis Interestelar.

Ante esto, se debe tener en cuenta que los elementos químicos con los cuales están conformados nuestros cuerpos, seres vivos, objetos, cosas que nos rodean, el planeta y en si todo el sistema solar, se han formado a través de diferentes procesos de nucleosíntesis desde los primeros minutos del universo, luego en el interior de las primeras estrellas (estrellas de primera generación) y finalmente en la explosión de éstas como supernovas, quedando todo este material disperso por el espacio.

Por ejemplo, el Hidrógeno presente en el agua que tomamos, tuvo su origen desde los primeros minutos de existencia del universo, mientras que el oxígeno que lo acompaña en la misma molécula se formó posteriormente en una estrella antecesora al Sol.

En la actualidad el Sol y todas las estrellas que podemos observar en las noches, están sintetizando nuevos elementos químicos, que en un futuro crearán nuevos mundos.

Para comprender mejor el origen de los elementos químicos en el universo, se presenta a continuación los diferentes tipos de Nucleosíntesis que han hecho posible nuestra existencia.

3.1.4.1. *Nucleosíntesis primordial o primigenia*

Es el primer proceso de síntesis de núcleos atómicos que se realiza en el Universo, mediante el cual se originan los elementos químicos más livianos y abundantes: el Hidrógeno y el

Helio. Este proceso sucede entre los 10^{-12} segundos y los 3 primeros minutos del Big Bang; período de tiempo en el cual el Universo en expansión se encontraba a una temperatura entre los 10^{12} y 10^9 K, con condiciones energéticas apropiadas para la formación de protones, neutrones y de los núcleos atómicos más livianos y estables.

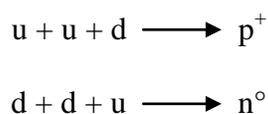
Es importante anotar que, en el período de tiempo desde que se origina el Big Bang y los 10^{-12} segundos de éste, se distinguen dos momentos conocidos como “La Era de Planck y “La Era Inflacionaria”, que no se estudiaran a fondo en este trabajo, pero que si merecen una corta mención. En cuanto a la Era de Planck, que transcurre hasta los 10^{-43} segundos, el Universo se encontraba en unas condiciones de temperatura, energía y densidad, muy extremas; ante lo cual, ha sido difícil de teorizar.

En la Era Inflacionaria, que sucede entre los 10^{-43} y 10^{-32} segundos del Big Bang, la temperatura del Universo es aún muy alta, entre los 10^{30} y 10^{13} K; siendo igualmente la energía muy alta, entre los 10^{18} y 1 GeV. Durante este período de tiempo, el Universo presentó una expansión acelerada, sucediendo diferentes eventos como, la disociación inicial de la fuerza de la gravedad, de las demás fuerzas aún unificadas; luego a los 10^{-35} segundos, se presenta la disociación de la fuerza fuerte de la fuerza electrodébil. Durante estas eras, aún no existe como tal, la materia ordinaria; pero si se presenta la existencia de partículas y antipartículas virtuales que se crean y desintegran continuamente.

Luego de los 10^{-32} segundos del Big Bang, el Universo inicia una nueva era, conocida como la Expansión Tranquila, período en el cual se disocian finalmente la fuerza electromagnética y la fuerza débil, al alcanzar el Universo una temperatura del orden de los 10^{15}

K. Posteriormente, a los 10^{-12} segundos el Universo continúa expandiéndose y aparecen las primeras partículas conocidas como bosones, de las cuales se originan los quarks y los leptones, partículas como los electrones (e^-), los positrones (e^+), los neutrinos (ν) y los antineutrinos ($\bar{\nu}$). Y hacia los 10^{-6} segundos, cuando alcanza una temperatura de 10^{13} K, se presenta el “Confinamiento de Quarks”, proceso mediante el cual y con la interacción de la fuerza fuerte, se forman los Hadrones, conocidos como Mesones y Bariones. Siendo los Mesones, partículas formadas por un quark y un antiquark; y los Bariones, partículas formadas por tres quarks, entre los cuales están los Protones (p^+) y los Neutrones (n^0).

La formación de los Protones y Neutrones se da a partir de los quarks de tipo up (u) y down (d). Los Protones se forman por confinamiento de dos quarks up (u) y un quark down (d); mientras que los Neutrones se forman por confinamiento de dos quarks down (d) y un quark up (u), como se indica a continuación:

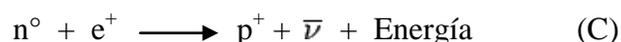
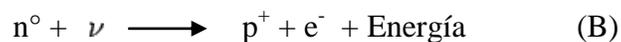
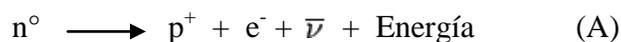


Tras la descripción anterior, la Bariogénesis, se convierte en el proceso generador de la Nucleosíntesis Primordial o Primigenia, puesto que, a partir de la fusión de Protones y Neutrones, se van a formar los primeros núcleos atómicos en el Universo; entendiendo además que, la formación del mismo Protón (p^+), da origen al núcleo atómico más sencillo, correspondiente al denominado Protio o isótopo más abundante del Hidrógeno (^1H).

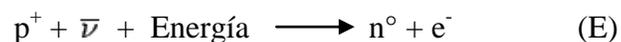
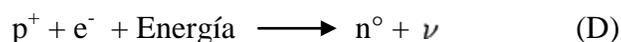
En cuanto a dichos procesos, la cantidad de protones y neutrones formados en esta etapa de la expansión del Universo fue aproximadamente igual; presentándose, además, procesos de

transformación de una partícula a otra por interacción con otras partículas o por procesos como el decaimiento β : β^- y β^+ (Sección 3.1.2.6), como se indican en las siguientes reacciones:

Reacciones de formación de Protones a partir de Neutrones



Reacciones de formación de Neutrones a partir de Protones



De acuerdo con las Reacciones D y E, el proceso es netamente endotérmico, debido a que el electrón y el antineutrino que interactúan con el protón, requieren energía para transformarlo en un neutrón. Mientras que en las reacciones A, B y C, los procesos son exotérmicos, lo que indica que se libera energía al transformarse un neutrón en protón. Esto se evidencia al observarse que la masa del neutrón es unos $2,306 \times 10^{-30}$ Kg (equivalente a unos $1,389 \times 10^{-3}$ u) mayor a la masa del protón.

Además, partiendo de la diferencia de masa entre el protón y el neutrón, se puede calcular la energía requerida para transformar un protón en un neutrón. Para tal fin, se procede a realizar dicha estimación con la ecuación de Einstein ($E = MC^2$), obteniéndose:

$$E = Mn^{\circ} C^2 - Mp^{+} C^2 \quad (7)$$

La cual se puede simplificar como:

$$E = (Mn^{\circ} - Mp^{+}) C^2 \quad (8)$$

Donde, C es la velocidad de la luz, Mn° es la masa del neutrón y Mp^{+} es la masa del protón.

Considerando las variables:

Velocidad de la Luz, $C = 2,99792 \times 10^8 \text{ m/s}$

Masa del neutrón, $Mn^{\circ} = 1,674929 \times 10^{-27} \text{ Kg}$

Masa del protón, $Mp^{+} = 1,672623 \times 10^{-27} \text{ Kg}$

Reemplazando los anteriores valores en la Ecuación 8, se obtiene:

$$E = (1,674929 \times 10^{-27} \text{ Kg} - 1,672623 \times 10^{-27} \text{ Kg}) \times (2,99792 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$E = (2,306 \times 10^{-30} \text{ Kg}) \times (8,9875 \times 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2)$$

$$E = 2,0725 \times 10^{-13} \text{ Kg m}^2/\text{s}^2 \quad \text{ó} \quad E = 2,0725 \times 10^{-13} \text{ J}$$

Como, 1 eV equivale a $1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

$$\text{Se obtiene: } E = 1,29 \times 10^6 \text{ eV} \quad \text{ó} \quad E = 1,29 \text{ MeV}$$

Esto indica que, para la reacción de transformación de un protón en un neutrón, se requiere una energía de 1,29 MeV; energía con la cual se puede calcular la temperatura del Universo, a través de la ecuación:

$$E \approx 3/2 (kT) \quad (9)$$

Despejando la variable temperatura, se obtiene:

$$T_U \approx 2 E / 3 k \quad (10)$$

Donde, E es la energía, k es la Constante de Boltzmann y T_U la Temperatura del Universo.

Considerando las variables:

Energía, $E = 1,29 \text{ MeV}$

Constante de Boltzmann, $k = 8,617 \times 10^{-11} \text{ MeV / K}$

Reemplazando los anteriores valores en la Ecuación 10, se obtiene:

$$T_U \approx 2 (1,29 \text{ MeV}) / 3 (8,617 \times 10^{-11} \text{ MeV / K})$$

$$T_U = 9,98 \times 10^9 \text{ K}$$

Donde, $T_U = 9,98 \times 10^9 \text{ K}$, es equivalente a 10^{10} K ; temperatura límite o mínima con la cual, el proceso de transformación de un protón en neutrón se puede realizar. Ahora, de acuerdo con el diagrama de “Historia del Universo de Fermilab” (Bill Gusky, 1984), que se aprecia en la Figura 7, la temperatura del Universo de $T_U = 10^{10} \text{ K}$, corresponde al primer segundo de expansión del Universo.

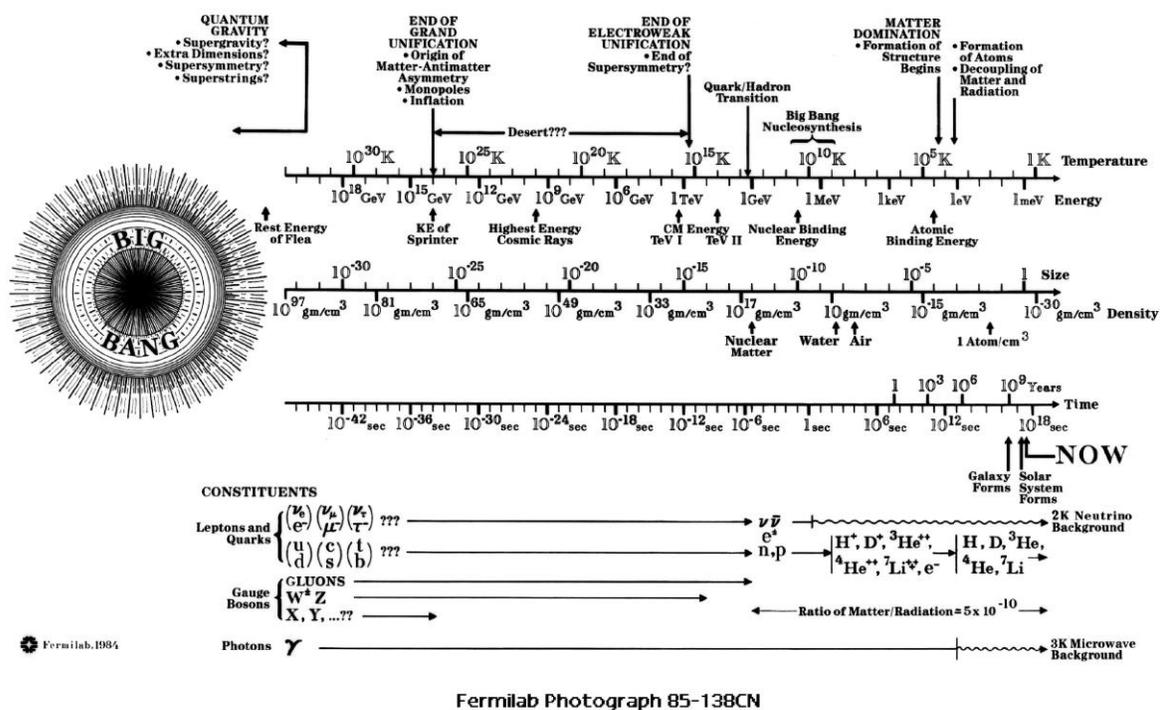


Figura 7: Diagrama Historia del Universo de Fermilab, (Bill Gusky, 1984)

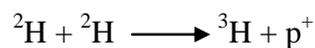
Fuente: Palaeos, <http://palaeos.com/cosmos/primordial/veryearlyuniverse.html>

Cuando el Universo en su proceso de expansión, alcanzó una temperatura menor a $T_U = 10^{10}$ K, ya no contaba con la suficiente energía para que los electrones interactuaran con los protones y se lograran formar más neutrones. En este momento, el proceso de formación de neutrones se detiene; y debido a su naturaleza inestable, los neutrones ya existentes, comienzan a decaer, transformándose en protones, a un ritmo muy rápido, provocando la disminución de la abundancia de éstos a un 15 % y el aumento de la abundancia de protones a un 85% en el Universo; se registra así, una proporción entre partículas de $6 p^+ / 1 n^0$.

Tras la continua expansión del Universo, la temperatura de éste, disminuye a unos 9×10^8 K, creándose las condiciones energéticas que posibilitaron la fusión de los protones y los neutrones, para formar los primeros núcleos atómicos más sencillos, correspondientes al isótopo del Hidrógeno-2 (^2H) denominado Deuterio, que cuenta con un protón y un neutrón en su núcleo; y seguidamente el Hidrógeno-3 (^3H) conocido como Tritio, con una menor abundancia, conteniendo en su núcleo un protón y dos neutrones.

Además, se da como efecto secundario el final del decaimiento de los neutrones libres; proceso que fue muy importante en cuanto a las abundancias del Hidrógeno y el Helio en el Universo; siendo para éste, un factor muy determinante la velocidad de enfriamiento del Universo tras la expansión, ya que a una mayor velocidad, el decaimiento de neutrones hubiese sido menor y por consiguiente una abundancia de protones y neutrones con poca diferencia, lo que se vería reflejado en una mayor abundancia de Helio, casi cercana a la del Hidrógeno. De lo contrario, si la velocidad de enfriamiento del Universo hubiese sido más lenta, el decaimiento de neutrones hubiese sido mayor, por lo que la diferencia de las abundancias sería muy amplia, determinando a futuro una abundancia del Hidrógeno muy alta ante una abundancia del Helio muy baja.

A partir de las abundancias iniciales de protones y neutrones en el Universo, el proceso de Nucleosíntesis Primordial se inicia con la formación de los isótopos del Hidrógeno: Deuterio (^2H) y Tritio (^3H), que presentan los siguientes procesos:



Para dicho proceso de nucleosíntesis, en especial para el Deuterio, se puede calcular la energía de enlace E_b , a partir de la Ecuación 1, que se estudió en la sesión anterior:

$$E_b = [Z (M_p^+) + N (M_n^\circ) - M_A] \times 931,494 \text{ MeV/u} \quad (1)$$

En donde, Z es el número atómico del isótopo del elemento a estudiar, M_p^+ es la masa del protón, N el número de Neutrones, M_n° la masa del Neutrón, M_A la masa atómica del isótopo a estudiar y $931,494 \text{ MeV/u}$, que corresponde a la masa de una unidad de masa atómica en MeV/c^2 .

Considerando las variables:

Número atómico del Deuterio, $Z = 1$

Masa del protón, $M_p^+ = 1,007825 \text{ u}$.

Masa del neutrón, $M_n^\circ = 1,008665 \text{ u}$.

Número de neutrones, $N = 1$

Masa atómica del Deuterio, $M_A = 2,014102 \text{ u}$.

Reemplazando las variables en la Ecuación 1, se obtiene:

$$E_b = [1 (1,007825 \text{ u}) + 1 (1,008665 \text{ u}) - 2,014102 \text{ u}] \times 931,494 \text{ MeV/u}$$

$$E_b = [2,016490 \text{ u} - 2,014102 \text{ u}] \times 931,494 \text{ MeV/u}$$

$$E_b = 0,002388 \text{ u} \times 931,494 \text{ MeV/u} \quad E_b = 2,2244 \text{ MeV}$$

De acuerdo con la energía de enlace obtenida, que corresponde a $2,2244 \text{ MeV}$, es la energía que se debe aplicar a un núcleo de Deuterio para descomponerlo en sus dos partículas constituyentes, el protón y el neutrón. De acuerdo con esto, si la radiación entre la que se

encuentren inmersas todas estas partículas en el Universo presenta una energía menor a 2,2244 MeV, los núcleos de Deuterio dejarían de descomponerse y se conservarían estables.

Para dicha energía, se puede conocer la temperatura del Universo T_U , aplicando la Ecuación 10:

$$T_U \approx 2 E / 3 k \quad (10)$$

Donde, considerando las variables:

Energía, $E = 2,2244 \text{ MeV}$

Constante de Boltzmann, $k = 8,617 \times 10^{-11} \text{ MeV / K}$

Y reemplazando dichos valores en la Ecuación 10, se obtiene:

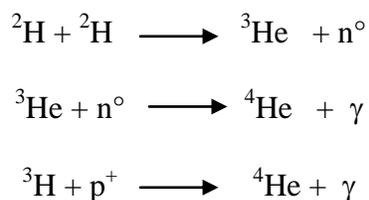
$$T_U \approx 2 (2,2244 \text{ MeV}) / 3 (8,617 \times 10^{-11} \text{ MeV / K})$$

$$T_U = 1,721 \times 10^{10} \text{ K}$$

Donde, $T_U = 1,721 \times 10^{10} \text{ K}$, es la temperatura límite o mínima con la cual, la descomposición de un núcleo de Deuterio se puede presentar.

Ahora, remitiéndonos a la Figura 7, del diagrama de “Historia del Universo de Fermilab” (Bill Gusky, 1984), la temperatura del Universo de $T_U = 1,721 \times 10^{10} \text{ K}$, corresponde al primer segundo de expansión del Universo; momento tras el cual y con la disminución de la T_U , bajo dicho valor límite, la abundancia del Deuterio, comienza a conservarse estable.

Luego, a partir del Deuterio formado en el Universo, se inicia el proceso de nucleosíntesis de los isótopos del Helio (He), tanto Helio-3 (^3He) y Helio-4 (^4He), como se representa en las siguientes reacciones:



Se aprecia de esta forma, cómo ha sido determinante la abundancia de los neutrones para la formación del Helio y su correspondiente abundancia.

En cuanto al Helio, si se analiza la Energía de enlace E_b , se encuentra que para descomponer un núcleo de ^4He , se requiere de una energía de 28,296 MeV, la cual se obtiene aplicando la Ecuación 1:

$$E_b = [Z (M_{\text{p}^+}) + N (M_{\text{n}^\circ}) - M_A] \times 931,494 \text{ MeV/u} \quad (1)$$

De igual forma, como se procedió con el cálculo de la energía del Deuterio, pero considerando las siguientes variables:

Número atómico del Helio, $Z = 2$

Masa del protón, $M_{\text{p}^+} = 1,007825 \text{ u}$.

Masa del neutrón, $M_{\text{n}^\circ} = 1,008665 \text{ u}$.

Número de neutrones, $N = 2$

Masa atómica del Helio, $M_A = 4,002603 \text{ u}$.

Reemplazando las variables en la Ecuación 1, se obtiene:

$$E_b = [2 (1,007825 \text{ u}) + 2 (1,008665 \text{ u}) - 4,002603 \text{ u}] \times 931,494 \text{ MeV/u}$$

$$E_b = [4,03238 \text{ u} - 4,002603 \text{ u}] \times 931,494 \text{ MeV/u}$$

$$E_b = 0,030377 \text{ u} \times 931,494 \text{ MeV/u}$$

$$E_b = 28,296 \text{ MeV}$$

Para dicha energía, se puede conocer la temperatura del Universo, aplicando la Ecuación 10:

$$T_U \approx 2 E / 3 k \quad (10)$$

Donde, considerando las variables:

Energía, $E = 28,296 \text{ MeV}$

Constante de Boltzmann, $k = 8,617 \times 10^{-11} \text{ MeV / K}$

Reemplazando las variables en la Ecuación 10, se obtiene:

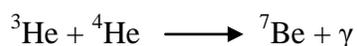
$$T_U \approx 2 (28,296 \text{ MeV}) / 3 (8,617 \times 10^{-11} \text{ MeV / K})$$

$$T_U = 2,1892 \times 10^{11} \text{ K}$$

Donde, $T_U = 2,1892 \times 10^{11} \text{ K}$, es la temperatura límite o mínima con la cual, la descomposición de un núcleo de Helio se puede presentar. Dato muy importante ya que, para cuando se comienzan a formar los núcleos de Helio, la edad y la temperatura del Universo no

superan dicho umbral mínimo de temperatura, por lo que núcleos de Helio se mantendrán estables y por consiguiente su abundancia.

Además, durante este proceso de Nucleosíntesis Primordial, se formaron con muy poca abundancia isótopos de Berilio (${}^7\text{Be}$) y Litio (${}^7\text{Li}$).



Para comprender mejor todo este proceso, se puede analizar la Figura 8 que se presenta a continuación, que hace referencia a la abundancia de los elementos livianos, durante la Nucleosíntesis Primordial.

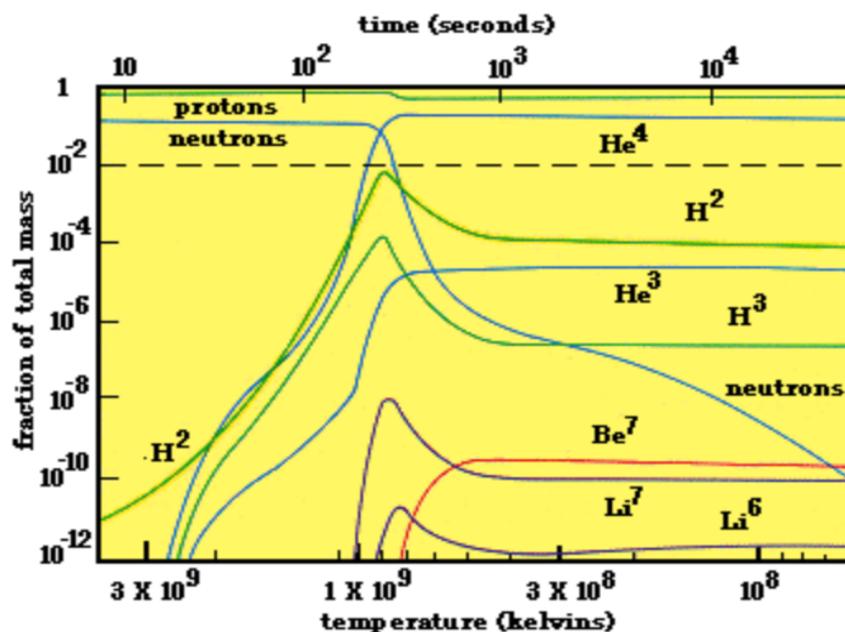


Figura 8: La evolución de las abundancias de elementos ligeros con el tiempo en el modelo estándar de la nucleosíntesis del Big Bang.

Fuente: Wright, Edward L. (2012). Big Bang Nucleosynthesis.

Recuperado de: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/BBNS.html>

En la Figura 8, se puede comprender de una forma gráfica el proceso de transformación y formación de los elementos ligeros durante los tres primeros minutos del Big Bang. En la gráfica se aprecia que, cuando han transcurrido aproximadamente 200 segundos, desde el Big Bang se alcanza un máximo de Deuterio (H^2), el cual decae al igual que la abundancia de los neutrones, mientras que la abundancia del Helio-4 (He^4) aumenta rápidamente, manteniéndose constante. Igualmente, el Tritio (H^3) también presenta un aumento en su abundancia y luego un decaimiento.

Esto explica que, a partir de la reacción entre Deuterio, Tritio y neutrones, se da la síntesis de Helio-4 (He^4) y Helio-3 (He^3); mientras que la abundancia del Protio o Hidrógeno-1 (H^1) se mantiene levemente constante.

Transcurridos los primeros cuatro minutos desde el inicio del Big Bang, el Universo en su proceso de expansión, alcanzó una temperatura menor a los 4×10^8 K, momento en el cual, la nucleosíntesis primordial llega a su fin, quedando disperso por el espacio, núcleos de los primeros elementos químicos ligeros como: Hidrógeno con una abundancia del 75% (en su mayoría Hidrógeno-1 y un 0,01% de Deuterio), Helio con una abundancia del 25% (en mayoría Helio-4 y trazas de Helio-3) y en muy poca abundancia núcleos de Litio y Berilio.

Al continuar la expansión del Universo, con el transcurso de aproximadamente 380.000 años, el Universo alcanzó una temperatura de 3000 K, lo que permitió que los núcleos de Hidrógeno y de Helio, capturasen electrones libres, para formar los primeros átomos neutros de los isótopos de estos elementos. El Universo, entra en lo que se ha denominado la “Etapa Fría”, que duró alrededor de unos 300 millones a 500 millones de años, período tras el cual, debido a la

acción gravitacional, se comenzaron a formar grandes nubes de Hidrógeno y de Helio, que darían origen a las primeras Nebulosas en el Universo; igualmente, a través de estas se fueron condensando aisladamente, “nódulos gaseosos” que poco a poco se fueron comprimiendo gravitatoriamente, dando origen a las primeras protoestrellas, para finalmente convertirse en las primeras estrellas en el Universo, llamadas estrellas de primera generación; y todo ese conglomerado de estrellas y nebulosas en conjunto, dieron origen a las galaxias. Se inicia así, una nueva etapa en la síntesis de nuevos elementos químicos en el Universo, con la “Nucleosíntesis Estelar”; proceso que aún persiste y se mantiene a través de las estrellas que percibimos en el cielo, junto con el Sol.

3.1.4.2. Nucleosíntesis estelar

Es la que se realiza en el interior de las estrellas durante su etapa de Secuencia Principal y como Gigante o Supergigante Roja. Durante estos períodos de tiempo se presenta la síntesis de elementos en un proceso en cadena desde el Hidrógeno y el Helio hasta los elementos de masa media y los más pesados, mediante procesos como la Cadena Protón-Protón, el proceso Triple Alfa (α), el Ciclo CNO, la Adición de Núcleos Alfa y el Proceso-s (Sección 3.1.2.2).

Es importante aclarar que, no todos los elementos químicos se sintetizan en todas las estrellas, lo cual depende en especial del factor de masa estelar, que se estipula con referencia en la Masa del Sol (M_{Sol}) de $1,989 \times 10^{30}$ kg. Ante esto, se distinguen básicamente dos tipos de estrellas, las de *Baja Masa* y las de *Gran Masa* o *Masivas*. Las estrellas de baja masa se encuentran entre $0,085$ y $9 M_{\text{Sol}}$, mientras que las estrellas de gran masa son las que presenta un rango entre 9 y $120 M_{\text{Sol}}$, o más masas solares, conocidas como hipergigantes.

Es importante aclarar que, cuerpos celestes con masa menor a 0,085 masas solares, no logran evolucionar en estrellas, convirtiéndose en lo que se conoce como Enanas Marrones, explicado por Alonso Sepúlveda como:

Son objetos que no lograron iniciar reacciones nucleares de fusión suficientes para encender la estrella. Tienen masas entre 0,013 y 0,085 masas solares (entre 13 y 80 masas de Júpiter), lo que apenas es suficiente para convertir ${}^1\text{H}^2$ en He^3 y producir una débil emisión de radiación. (Sepúlveda, 2014, pág. 114).

Agrega Alonso Sepúlveda, que son en sí, estrellas fallidas, puesto que son objetos que se quedaron entre planetas y estrellas, siendo muy parecidos a planetas gaseosos. Además, se estiman muy abundantes en el Universo.

Las Estrellas, tanto las de Baja Masa ($0,085 M_{\text{Sol}} < M_E < 9 M_{\text{Sol}}$) como las de Gran Masa ($9 M_{\text{Sol}} < M_E < 120 M_{\text{Sol}}$), se forman a partir de grandes nebulosas de gas y polvo cósmico, ricas básicamente en Hidrógeno (H) y Helio (He); además de tener la posibilidad de contener otros elementos químicos, productos aportados por otras estrellas de la primera generación ya extintas.

Las Estrellas inician su proceso de formación dentro de una gran nebulosa, en especial las conocidas como “nebulosas oscuras”. El proceso comienza en regiones que por interacción gravitatoria van aglomerando y condensando masa, conformándose en nódulos nebulares, los cuales de acuerdo con su proceso de formación y condiciones circundantes en la nebulosa, van a capturar y a contener masas diferentes entre sí. Pero no todos los nódulos nebulares, tienen la

posibilidad de convertirse finalmente en estrellas. En primer lugar, sólo aquellos que, por sus condiciones de temperatura y de densidad, logren alcanzar y/o superar la “Masa de Jeans” (M_J), podrán colapsar gravitatoriamente.

La Masa de Jeans se puede calcular con la ecuación:

$$M_J = 7.5 \times 10^{21} \text{ kg} \sqrt{\frac{T^3}{\rho}} \quad (11)$$

Donde, T corresponde a la temperatura y ρ a la densidad del nódulo globular.

De acuerdo a lo anterior, el proceso de colapso de un nódulo nebuloso, se puede entender mejor a partir de lo que explica Jorge Zuluaga:

Cualquier pedazo de nube que tenga una masa mayor o igual a la masa de Jeans, al ser perturbada se derrumbará irremediablemente. Las porciones de nube de masa menor colapsarán un poco hasta que la presión crece en su interior y rebotarán hacia afuera. La masa de Jeans es como la “cuota inicial” para el colapso: si la tienes colapsas, si no la tienes te conformas con una oscilación que se amortigua.

Como puede verse en la fórmula anterior, entre más caliente es una nube (mayor temperatura) mayor es la “cuota inicial” para el colapso, es decir, solamente porciones muy grandes de nube podrán colapsar. Esto último, si se cumple que la perturbación sea del tamaño apropiado. Se entiende este resultado porque a mayor

temperatura mayor tendencia a disiparse y por lo tanto hace falta más masa para vencer a la presión. De otro lado, entre más densa la nube (mayor ρ en el denominador), menor es la masa de Jeans, es decir, en una nube densa, pequeñas porciones alcanzan la “cuota inicial” del colapso con facilidad. (Zuluaga, 2007, p. 162).

En segundo lugar, un nódulo nebuloso además de alcanzar la Masa de Jeans para su colapso gravitatorio debe también contener y/o superar una masa de $0,085 M_{\text{Sol}}$, para convertirse en una estructura gaseosa esferoide denominada “Protoestrella”, que posteriormente se convertirá en Estrella.

Cuando al interior de la Protoestrella comienza a aumentar su densidad y temperatura, entre unos 2000 a 3000 K, ésta empieza a calentarse y a emitir radiación infrarroja (calor); y cuando alcanza temperatura de 1 millón de K, la Protoestrella inicia sus primeras reacciones de fusión nuclear, logrando fusionar núcleos de Deuterio, sintetizando núcleos de Helio. Además, si en su interior alcanza temperaturas entre los 50.000 K y 150.000 K y en su superficie de unos 3.500 K, la Protoestrella comienza a emitir luz. Pero, como lo explica Alonso Sepúlveda:

Cuando la temperatura central de la Protoestrella alcanza cerca de 15 millones K y la densidad es de 100 g/cm^3 , comienzan las reacciones nucleares de fusión que convierten H en He, ocasionando un inmenso desprendimiento de energía que es capaz de detener la contracción de la nube y lograr que, por el aumento de presión, está entre en un estado de equilibrio hidrostático. (Sepúlveda, 2014, p. 113).

Es en dicho momento cuando, la Protoestrella se convierte en Estrella y entra a lo que se denomina durante su ciclo de vida, la etapa de “Secuencia Principal”; y de acuerdo con su masa, es clasificada y ubicada en el conocido “Diagrama Hertzsprung-Russell” (H-R) (véase la Figura: 14); además de determinar su proceso de evolución, su tiempo de vida, su temperatura, luminosidad y síntesis de elementos químicos.

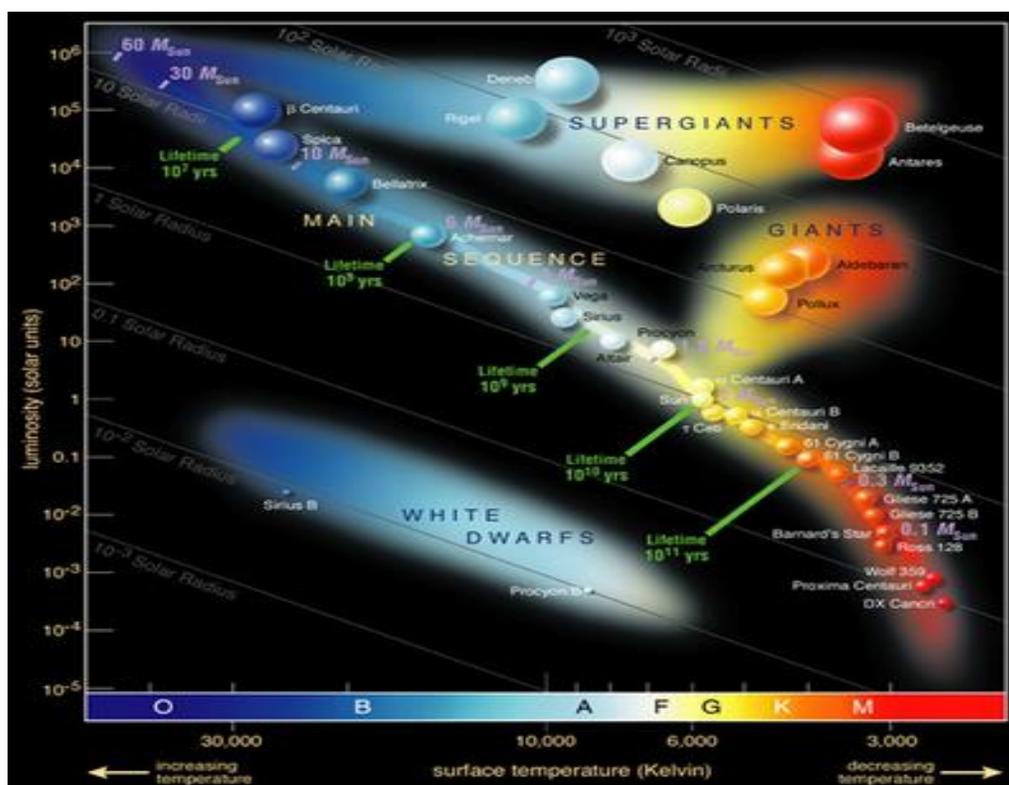


Figura 9: Diagrama Hertzsprung-Russell (H-R)

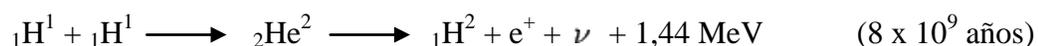
Fuente: Wikipedia, https://es.wikipedia.org/wiki/Diagrama_de_Hertzsprung-Russell

El proceso de síntesis de estos elementos se inicia en el núcleo de la estrella, a partir de la fusión del Hidrógeno en Helio, por medio de las Cadenas Protón-Protón, que se explican a continuación.

Las cadenas protón-protón (p-p)

Son tres tipos de procesos que se presentan en las estrellas, mediante los cuales se produce Helio-4 (${}^4_2\text{He}$) a partir de Hidrógeno-1 (${}^1_1\text{H}$). Son denominados como: Cadena p-p I, Cadena p-p II y Cadena p-p III.

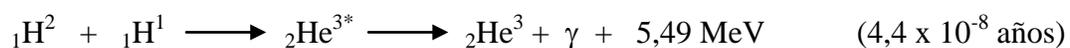
La Cadena p-p I, se inicia con la fusión de dos núcleos de Hidrógeno-1 (Protio: ${}^1_1\text{H}$), obteniéndose un núcleo de Helio-2 (${}^2_2\text{He}$) muy inestable. De donde posteriormente, uno de sus protones, mediante Desintegración β^+ , se transmuta en neutrón, emitiendo un positrón (e^+) y un neutrino (ν), convirtiéndose el núcleo de Helio-2 en un núcleo de Hidrógeno-2 (Deuterio: ${}^2_1\text{H}$), como lo presenta Alonso Sepúlveda:



Entre paréntesis aparece la vida media de este proceso, que es bastante larga. Se entiende por *vida media* de un proceso nuclear el tiempo necesario para que la cantidad de reactivo se reduzca a la mitad. Esto significa que una vida media muy larga, como es el caso anterior, corresponde a una reacción muy lenta. (Sepúlveda, 2014, p. 99).

Además, es de anotar que, el valor de 1,44 MeV es la energía liberada al final del proceso.

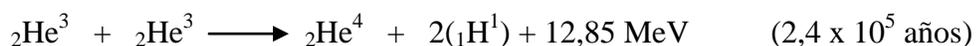
Posteriormente, el Deuterio formado, continúa fusionándose con núcleos de Hidrógeno-1, para formarse Helio-3 (${}^3_2\text{He}$) con la liberación de fotones y energía:



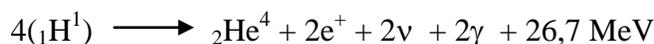
(Sepúlveda, 2014, p. 100)

Siendo el valor de 5,49 MeV la energía liberada al final del proceso; y entre paréntesis aparece la vida media de dicho proceso.

Con la formación y acumulación de Helio-3, se sigue en cadena la fusión de estos núcleos, para producir finalmente núcleos de Helio-4 (${}_2\text{He}^4$) y de Hidrógeno-1 (${}_1\text{H}^1$) con liberación de energía.



En síntesis:



(Sepúlveda, 2014, p. 100)

Donde los valores de 12,85 MeV y 26,7 MeV son las energías liberadas al final de cada proceso; y entre paréntesis aparece la vida media de dicho proceso.

Todo este proceso de la Cadena p-p I, sucede en el núcleo de las estrellas durante su etapa de secuencia principal, presentándose además de la producción de Helio-4, la liberación de positrones (e^+), neutrinos (ν) y fotones (γ) de alta energía, los cuales a través de su viaje hacia el

exterior van perdiendo energía, lo que posibilita que la estrella emita radiación en toda la gama del espectro electromagnético, en especial fotones de luz visible y del infrarrojo.

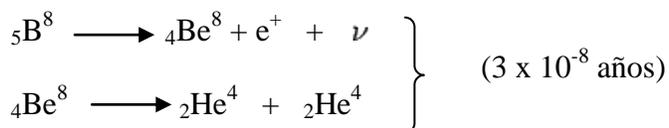
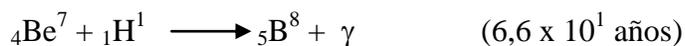
Cadena p-p II, es en sí, una posible segunda ruta que puede tomar la Cadena p-p para obtener Helio-4 a partir del Helio-3 formado durante la Cadena p-p I.



(Sepúlveda, 2014, p. 102)

Siendo los valores que aparecen entre paréntesis, la vida media de cada proceso.

Cadena p-p III, es igualmente una posible tercera variación de la ruta de la Cadena p-p, a partir de la Cadena p-p II, para obtener Helio-4 a partir del Berilio-7.



(Sepúlveda, 2014, p. 103)

Recordando que, entre paréntesis aparece la vida media de cada proceso.

Según Sepúlveda (2014), Las tres cadenas protón-protón tienen lugar a temperaturas del orden de 15 millones K y densidades de 100 g/cm^3 en las zonas centrales de las estrellas durante su etapa de secuencia principal o en las capas no centrales de las gigantes y supergigantes rojas.

Además, se aprecia durante el proceso de las Cadenas protón-protón, que se sintetizan adicionalmente isótopos de Litio (Li), Berilio (Be) y Boro (B), los cuales son inestables (con tiempos de vida media cortos) e igualmente se descomponen en Helio (He).

La Estrella, al final de la etapa de secuencia principal, ha transformado en casi su totalidad el Hidrógeno en Helio, quedando en ésta un núcleo rico en Helio, rodeado por una capa remanente de Hidrógeno. En dicho momento, en su interior se reducen las reacciones de fusión, al igual que su temperatura y presión interna, entrando en desequilibrio hidrostático, por lo que la estrella desde sus capas exteriores se contrae por acción gravitatoria. Esta contracción hace que aumente de nuevo la densidad y la temperatura en el interior de la estrella hasta alcanzar la suficiente temperatura para que se reinicie la fusión de Hidrógeno que se encuentra en una capa rodeando el núcleo de Helio, para entrar de nuevo la estrella en estabilidad hidrostática.

Es importante anotar que, el tiempo de vida de una estrella, está determinada por la masa que contenga. Es así cómo, las estrellas de gran masa, presenta mayor temperatura en su interior, logrando el proceso de fusión nuclear del Hidrógeno más rápido que en las estrellas de baja masa, que el proceso es más lento.

Ahora bien, cuando en el núcleo de la estrella se ha agotado todo el Hidrógeno (H), convirtiéndose en Helio (He), los procesos de fusión nuclear cesan, puesto que la temperatura

interna de 15 millones K, no son suficientes para continuar con la fusión del Helio, “que necesita temperaturas de más de 100 millones K” (Sepúlveda, 2014, p. 120).

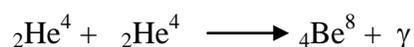
En este momento la estrella experimenta nuevamente otra contracción de sus capas externas, posibilitando el aumento de la densidad y temperatura interna, hasta alcanzar los 15 millones K, para dar inicio a las reacciones de fusión del Helio; donde parte de la energía liberada al principio, la absorbe la capa externa al núcleo, generando una expansión de ésta y en general de la estrella, con aumento de la luminosidad y la temperatura superficial que, “según la ley de Wien, la estrella toma un color rojizo” (Sepúlveda, 2014, p. 121). La estrella finalmente sale de su etapa de “Secuencia Principal” y entra a la fase de “Gigante o Supergigante Roja”.

Durante esta etapa de Gigante o Supergigante Roja, la estrella alcanza la temperatura óptima para la fusión del Helio en el núcleo, a través del Proceso Triple alfa, para obtener núcleos de Carbono (C) y posteriormente con la abundancia de éste iniciar el Ciclo CNO.

El proceso triple α (alfa)

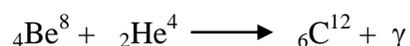
Este proceso corresponde a la fusión de tres núcleos de Helio-4 (${}^4_2\text{He}$), conocidos también como Núcleos Alfa (α), para formar un núcleo de Carbono-12 (${}^{12}_6\text{C}$), a partir del cual se inicia la formación de otros elementos químicos. Este proceso se inicia cuando la estrella entra a una nueva etapa de su ciclo de vida, luego de haber convertido gran parte de su Hidrógeno en Helio, pasando de la secuencia principal, a la etapa de gigante y supergigante roja, alcanzando en su núcleo temperaturas de aproximadamente 100 millones de K y una densidad de 100.000 g/cm^3 .

El proceso Triple α , se realiza en la siguiente secuencia de reacciones:

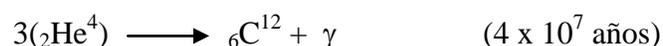


Donde el Berilio-8 (${}_4\text{Be}^8$), como lo indica J. Guasp (1975, p. 37) es un núcleo muy inestable y cuyo estado fundamental posee una vida media de $2,6 \times 10^{-16}$ segundos.

Luego el Berilio-8, debe reaccionar rápidamente con otro núcleo de Helio-4, para producir Carbono-12, de lo contrario termina descomponiéndose nuevamente en Helio-4.

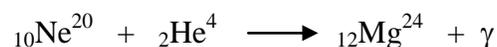
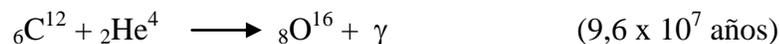


En general, el proceso triple α se puede abreviar con la reacción:



Entre paréntesis aparece la vida media de dicho proceso.

Tras la formación de Carbono, prosigue una secuencia de reacciones de nucleosíntesis con adición de núcleos α , obteniéndose elementos como Oxígeno (O), Neón (Ne) y Magnesio (Mg), como se indica en las siguientes reacciones:



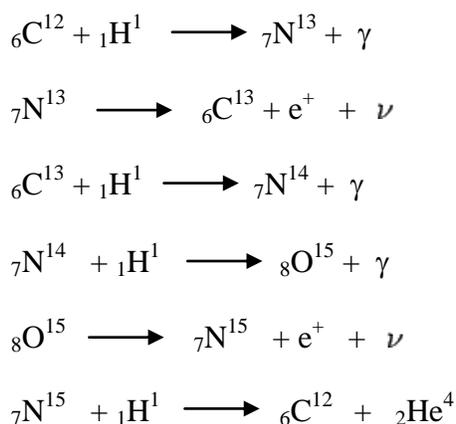
(Sepúlveda, 2014, p. 105)

Donde, entre paréntesis aparece la vida media de cada proceso.

Por último, la reacción triple α , ha tomado también importancia puesto que, como lo menciona J. Guasp: “Fue sugerida por Opick (1951), Salpeter (1952) y Hoyle (1953) para paliar el principal obstáculo que se oponía al desarrollo de la NS: la no existencia de núclidos de número másico 5 y 8 estables” (Guasp, 1975, p. 37). Donde la abreviatura NS, corresponde al término Nucleosíntesis.

El ciclo CNO

También llamado Ciclo del Carbono, es un proceso de fusión nuclear en el que intervienen inicialmente un núcleo de Carbono-12 con un núcleo de Hidrógeno-1 o protón, para entrar en una serie de reacciones en cadena formándose Nitrógeno (N) y Oxígeno (O), para finalmente terminar en Carbono y Helio; material que queda de nuevo a disposición para reiniciar otro ciclo. Durante el proceso se presenta la siguiente secuencia de reacciones, como lo indica Sepúlveda:



La suma tiene la forma:



(Sepúlveda, 2014, p. 103)

Siendo el valor 25 MeV es la energía liberada al final del proceso.

La secuencia de reacciones anteriormente presentada, pueden ser visualizadas a continuación en la Figura 10.

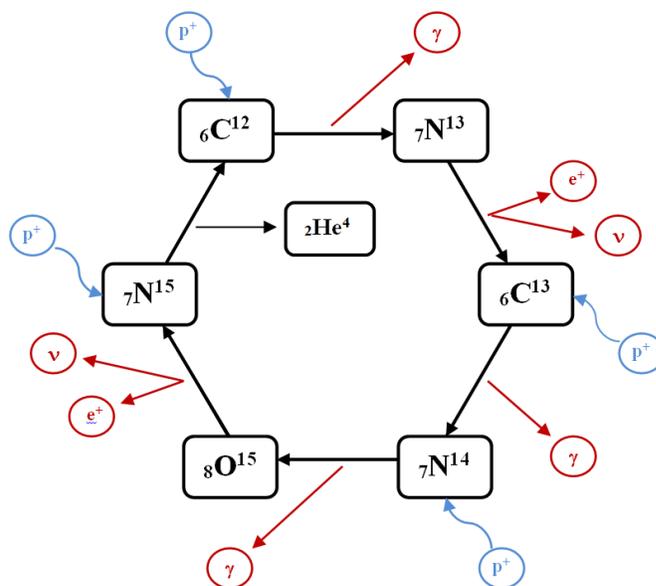


Figura 10: El Ciclo C-N-O.

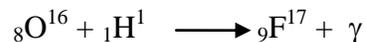
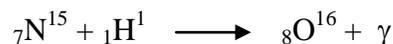
Fuente: Elaboración propia, a partir de las figuras presentadas por Tancredi G. (s.f.). *El origen de los elementos químicos*, p. 30. Montevideo, Uruguay: Departamento Astronomía, Instituto de Física, Facultad de Ciencias. Recuperado de:

<http://www.cte.edu.uy/Materiales/PowerPoint/Espacio/El%20Origen%20de%20los%20Elementos%20Quimicos.ppt>

Y de Sepúlveda Soto, A. (2014). *Bases de astrofísica*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia, p. 103.

Este proceso requiere que la estrella cuente con una temperatura en su núcleo de 15 millones de K y la presencia de Carbono previamente sintetizado a partir de la fusión del Helio (Proceso Triple α) en estrellas más calientes que el Sol o ya sea como éste, que han adquirido el Carbono al formarse como estrellas de segunda generación a partir del material expulsado por otras estrellas de primera generación ya extintas.

Junto con el Ciclo del CNO, se presentan otros dos ciclos menores que se derivan con respecto al Nitrógeno (N) y al Oxígeno (O), que permite la síntesis adicional del Flúor (F), como se muestra en las siguientes reacciones, según Alonso Sepúlveda:



(Sepúlveda, 2014, p. 104)

Reacciones que se visualizan de forma esquemática en la siguiente figura:

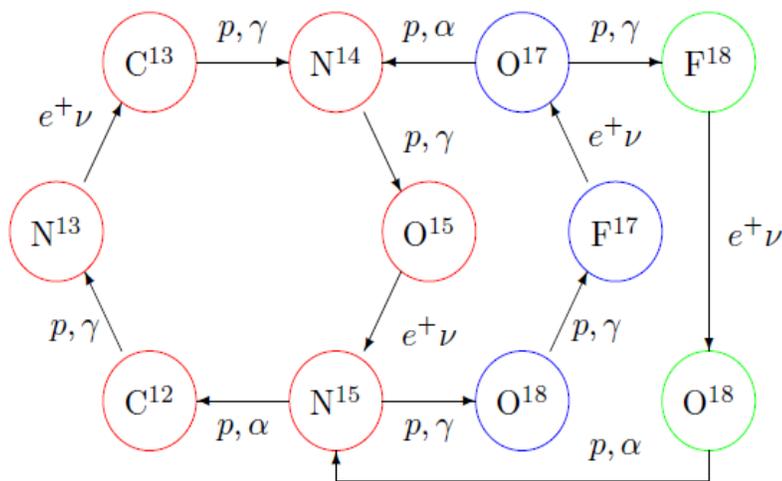


Figura 11: El Tri-Ciclo C-N-O-F.

En rojo: ciclo principal, en azul: subciclo del O¹⁶, en verde: subciclo del O¹⁸.

Fuente: Imagen tomada de Vucetich, H. (2004). *Interiores estelares*, pp. 156

Recuperado de <http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/~acorsico/ie/IntEst04.pdf>

Finalmente, un aporte significativo del proceso CNO, es en cuanto a la producción y abundancia del Nitrógeno, como lo explica Satorre:

Un aspecto importante de este ciclo es que puede dar lugar a la aparición de cantidades significativas de nitrógeno. Hay que tener en cuenta que el nitrógeno es el 5° elemento por orden de abundancia, aunque no es el producto final de ninguna de las principales secuencias de combustión. Sin embargo, una estrella que está quemando hidrógeno y compuesta inicialmente por un material rico en ^{12}C , producirá rápidamente Nitrógeno, de acuerdo con los tres primeros pasos del ciclo anterior. A pesar de todo, el nitrógeno se consume en las siguientes fases, pero su abundancia todavía es elevada en relación con el carbono durante esta fase de evolución estelar, porque tiene una sección de captura de protones menor que la del carbono. (Satorre, 1978, p. 11).

Tras los anteriores procesos de nucleosíntesis, las estrellas en general, tanto las de Baja Masa como las de Gran Masa, logran sintetizar ciertos elementos químicos livianos (elementos con números atómicos menores al Hierro), quedando pendiente la formación de los demás elementos livianos y pesados (elementos con números atómicos mayores al Hierro, llamados transférricos).

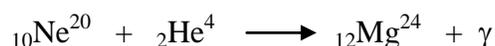
A partir de este momento es importante considerar la masa de las estrellas para conocer los procesos posteriores que definirán la formación de los demás elementos livianos y pesados, de acuerdo con el ciclo de vida de cada estrella.

Es así como, en Estrellas de Baja Masa ($0,085 M_{\text{Sol}} < M_E < 9 M_{\text{Sol}}$), entre las cuales está incluido el Sol, se logran sintetizar núcleos atómicos de los elementos químicos livianos, que se han descrito hasta el momento, a través de los procesos de: Cadena Protón-Protón, Triple Alfa (α) y el Ciclo CNO; los cuales posteriormente, son liberados al espacio cuando en la etapa final de la estrella, se desprenden sus capas externas generando una Nebulosa Planetaria y quedando en su interior una Estrella Enana Blanca, rica en Carbono (C) y Oxígeno (O).

Pero en Estrellas de Gran Masa ($9 M_{\text{Sol}} < M_E < 120 M_{\text{Sol}}$), igualmente se logran sintetizar los elementos químicos que se forman en estrellas de Baja Masa, ya indicados anteriormente y además, otros elementos químicos livianos y pesados, a través de dos procesos como: la Adición de Núcleos Alfa y el Proceso-s, antes de su explosión como Supernova.

La adición de núcleos alfa (α):

La Estrella en su etapa de Supergigante Roja, al contener en su interior una abundancia de Carbono y Helio, prosigue una secuencia de reacciones de nucleosíntesis con adición de núcleos α o de Helio, obteniéndose elementos como Oxígeno (O), Neón (Ne) y Magnesio (Mg) entre otros, como lo indica Alonso Sepúlveda en las siguientes reacciones:



(Sepúlveda, 2014, p. 105)

Teniendo en cuenta que, entre paréntesis aparece la vida media de cada proceso.

El proceso continúa, hasta lograr formar nuevos núcleos atómico hasta el Hierro o cercanos a su isótopo Hierro-56 (Fe^{56}). La Estrella se va tornando en capas, donde los elementos pesados se concentran en el interior o núcleo y los demás de acuerdo con sus densidades se van agrupando por capas, como: Silicio (Si), Oxígeno (O), Carbono (C), Helio (He) e Hidrógeno (H).

Hasta este momento los procesos de fusión de núcleos atómicos antes del Hierro liberan energía (proceso exotérmico); pero para la fusión de núcleos atómicos por encima del Hierro, se requiere de energía (proceso endotérmico); lo cual no se logra en la estrella durante esta etapa, puesto que en la síntesis de Hierro, la estrella deja de producir energía, convirtiéndose en el proceso límite de la nucleosíntesis, afectando térmicamente a la estrella, llevándola posteriormente a su colapso final.

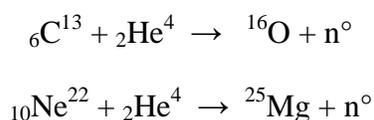
Pero antes de que se dé el colapso total de la estrella y explote como Supernova, se presenta el Proceso-s, que no requiere un consumo elevado de energía para la síntesis de algunos elementos más pesados, como se explica a continuación.

El Proceso-s:

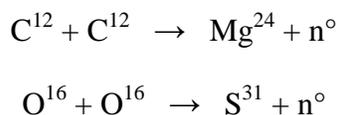
Teniendo como apoyo teórico lo presentado en la Sección 3.1.2.2., se procede a comprender el proceso de síntesis de elementos más pesados a partir de la captura lenta de neutrones.

Este proceso se da cuando, estrellas con masas mayores a la del Sol, se encuentra en la etapa de Gigante y Supergigante Roja de su ciclo de vida, especialmente en las situadas en la llamada “Rama Asintótica Gigante” (conocidas como AGB: Asymptotic Giant Branch).

Durante esta etapa, la estrella inicia una serie de reacciones termonucleares de adición de núcleos de Helio-4 (núcleos α), que posibilita la liberación o emisión de neutrones, que son materia prima para el proceso como:



Y a partir de otros procesos de fusión del Carbono-12 y el Oxígeno-16, como lo indica J. Guasp (1975, p. 65-66), con las reacciones:



De donde se obtienen densidades de neutrones aproximados entre los 10^{11} y los 10^{12} $\text{n}^\circ/\text{cm}^3$.

Ahora, con tanta abundancia de neutrones, el Proceso-s se inicia a partir de núcleos “semilla” correspondiente al Hierro-56 (Fe^{56}), el cual captura un neutrón (n°), transformándose en Fe^{57} ; con otra captura de neutrón en Fe^{58} ; y luego con otra captura de neutrón en Fe^{59} . Este proceso se realiza de forma lenta, hasta el momento en que éste último isótopo es inestable y uno de sus neutrones se transforma en protón, convirtiéndose el isótopo Fe^{59} en Cobalto Co^{59} ; y así

sucesivamente se va formando Níquel (Ni) y luego Cobre (Cu), entre otros, como se puede apreciar esquemáticamente en la Figura 12.

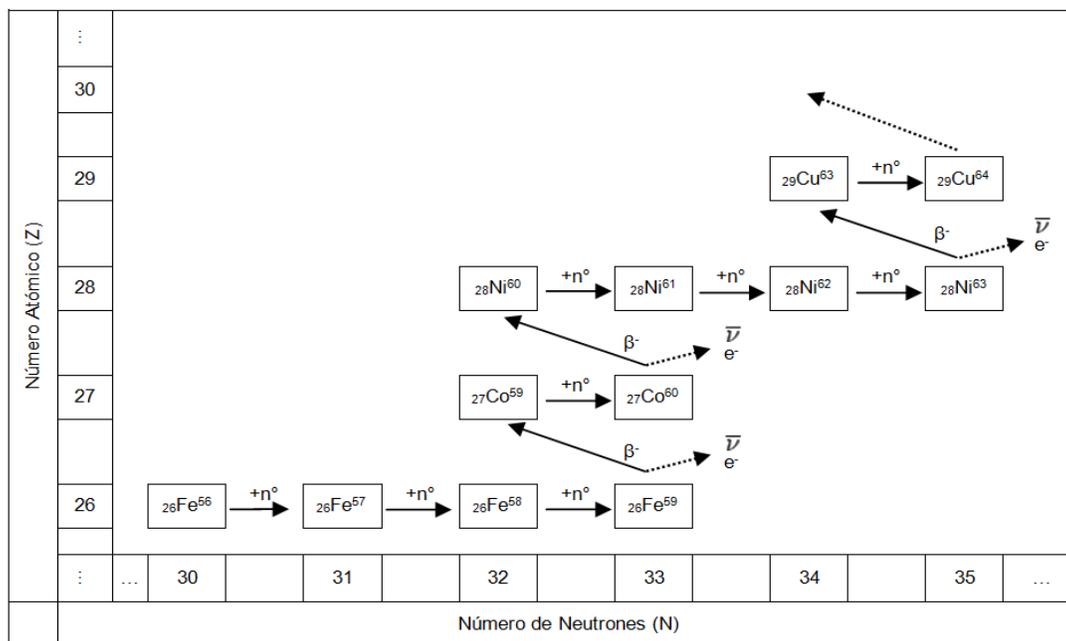
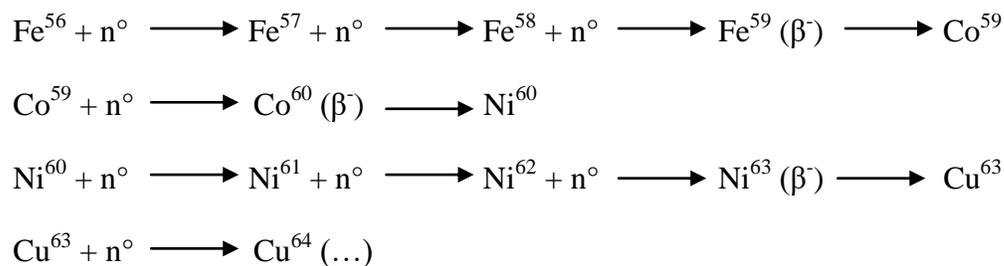


Figura 12: Proceso-s, secuencia de captura de neutrones a partir del Hierro (Fe) hasta el Cobre (Cu).

Fuente: Elaboración propia, a partir de la figura realizada por Mafalda Martins de la ESO, presentada en el artículo de Rebusco, P., Boffin, H. and Pierce-Price, Douglas. (2007). Fusion in the universe: where your jewellery comes from. *Science in School*, (5), pp. 53. Recuperado de http://www.scienceinschool.org/sites/default/files/teaserPdf/issue5_fusion.pdf

Lo representado en la figura anterior, igualmente se puede visualizar con la siguiente secuencia de reacciones:



El proceso continúa en cadena, formando y acumulando poco a poco más isótopos estables de los elementos más pesados que el Hierro. Además, existen los llamados “Números Mágicos” que corresponden a núcleos atómicos en equilibrio con un número de neutrones (N) específicos, relacionados con la abundancia de estos. Dichos “Números Mágicos” con $N = 50$, que corresponde a elementos como Estroncio (Sr), Itrio (Y) y Zirconio (Zr); $N = 82$, para elementos como Bario (Ba), Lantano (La), Cerio (Ce) y Praseodimio (Pr); y $N = 126$, para elementos como Plomo (Pb) y Bismuto (Bi).

El Proceso-s, llega a su fase final cuando sintetiza Plomo (Pb) y Bismuto (Bi), como lo explica Héctor Vucetich (2004):

El camino principal atraviesa la secuencia de plomos ($^{206}; ^{207}; ^{208}; ^{209}\text{Pb}$), este último es inestable y se desintegra β a ^{209}Bi , el “último elemento estable”. El ^{209}Bi absorbe otro neutrón y pasa a ^{210}Bi , que se desintegra β a ^{210}Po , que a su vez se desintegra α a ^{206}Pb cerrando de este modo el ciclo. (Vucetich, 2004, p. 267)

El Proceso-s, permite la síntesis de aproximadamente la mitad de los elementos químicos más pesados que el Hierro (Fe), con isótopos estables que presentan pocos neutrones o en cantidad proporcional a los protones, durante períodos de tiempos muy largos, alrededor de los miles de años, cuando, como ya se mencionó, la estrella se encuentra en su etapa de Gigante y Supergigante Roja.

En resumen, en las estrellas de Gran Masa, durante su etapa de Secuencia Principal y de Supergigante Roja, se logran sintetizar los elementos: Carbono (C), Nitrógeno (N), Oxígeno (O), Neón (Ne), Azufre (S), Flúor (F), Sodio (Na), Magnesio (Mg), Aluminio (Al), Silicio (Si), Fósforo (P), Cloro (Cl), Argón (Ar), Potasio (K), Calcio (Ca), Escandio (Sc), Titanio (Ti), Vanadio (V), Cromo (Cr), Manganeso (Mn), Hierro (Fe), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Arsénico (As), Estroncio (Sr), Itrio (Y), Zirconio (Zr), Niobio (Nb), Molibdeno (Mo), Tecnecio (Tc), Rutenio (Ru), Paladio (Pd), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Indio (In), Estaño (Sn), Bario (Ba), Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Prometio (Pm), Samario (Sm), Iterbio (Yb), Hafnio (Hf), Tantalio (Ta), Tungsteno (W), Mercurio (Hg), Talio (Tl), Plomo (Pb) y Bismuto (Bi).

3.1.4.3. Nucleosíntesis explosiva o en supernovas

El origen de los elementos químicos más pesados, que corresponden a números atómicos superiores al Hierro-56, hasta el Uranio-238, tienen también sus procesos de formación a través de la explosión de *Supernovas*, *Hipernovas* y *Kilonovas*, puesto que en dicho evento se libera tanta energía (del orden de 10^{44} J) que permite mediante el Proceso-r, la síntesis de núcleos más pesados, que no se lograron formar por medio del Proceso-s en la etapa de Supergigante Rojas; además de posibilitar el esparcimiento por el espacio, de todos los elementos químicos sintetizados en la estrella.

Para comprender el proceso de nucleosíntesis explosiva, es importante hacer inicialmente una presentación general sobre el tema de las Supernovas, las Hipernovas (Super-Supernovas) y las Kilonovas.

Las *Supernovas (SN)*, son grandes explosiones que se presentan al final de la vida de las Estrellas de Gran Masa o Masivas.

Las *Supernovas* se clasifican en dos tipos: *Supernovas tipo I, (SN I)* y *Supernovas tipo II, (SN II)*, de acuerdo con la presencia o ausencia de Hidrógeno, según estudios espectrales. Las de tipo *SN I*, se caracterizan por tener su origen a partir de Estrellas Enanas Blancas y no presentan registro de Hidrógeno en su espectro. Las de tipo *SN II*, se caracterizan por tener su origen a partir de Estrellas Supergigantes Rojas y si registran Hidrógeno en su espectro. Sus respectivas subdivisiones se realizan en cuanto a los procesos que las generan y la presencia de otros elementos químicos.

Las Supernovas del tipo I (*SN I*), se subclasifican en *Supernovas Ia (SN Ia)*, *Supernovas Ib (SN Ib)* y *Supernovas Ic (SN Ic)*.

Las *SN Ia*, se caracterizan por no presentar Helio en su espectro, pero si registran presencia de Silicio cuando se acerca a su máximo brillo; y al llega a su etapa final, indica la presencia de Hierro y Cobalto. Este tipo de supernova, como ya se mencionó, tienen su origen a partir de una Estrella Enana Blanca de Carbono-Oxígeno, que hace parte de un sistema binario, donde su compañera es una estrella Gigante Roja. Otro posible sistema binario que puede dar origen a supernovas de este tipo es entre dos Estrellas Enanas Blancas.

En cuanto al sistema Enana Blanca – Supergigante Roja, las dos estrellas al encontrarse a una adecuada distancia mayor al denominado “Límite de Roche”, el sistema binario se mantendrá estable ante su interacción gravitatoria; pero si debido a alguna eventualidad entre ambas estrellas, debido a la expansión de las capas externas de la Estrella Supergigante Roja, se trasgrede o sobrepasa el límite de Roche, la Estrella Enana Blanca comenzará a capturar o absorber el material gaseoso que posee la Gigante Roja en sus capas externas (básicamente de Hidrógeno y Helio), de forma considerablemente rápida. Cuando la Enana Blanca alcanza y supera el límite de Chandrasekhar de 1,44 masas solares, su presión interna no logra sostener la gran carga de materia adquirida, por lo que ésta colapsa hacia su núcleo, provocando el aumento de la temperatura interna e iniciando la combustión del Carbono (C), para luego liberar una gran cantidad de energía en forma de una gran explosión, como lo explica Alonso Sepúlveda:

La energía producida en la fusión del C genera una onda de choque que destruye la estrella, expulsando su masa a velocidades de 10.000 km/s, y aumentando su luminosidad hasta lograr que sean las más luminosas de todas las supernovas. Emiten unos 10^{44} J. (Sepúlveda, 2014, p.150-151).

Tras el mencionado evento explosivo, la Estrella Enana Blanca termina totalmente destruida, puesto que según Bethe y Brown:

La energía de enlace inicial que mantiene unida la estrella es de unos 10^{50} erg; la energía liberada por la combustión es 20 veces mayor (2×10^{51} ergs), suficiente

para explicar la velocidad de diez mil kilómetros por segundo de los restos de la supernova. (Bethe y Brown, 1985, p.101).

Quedando la estrella en restos de gas y polvo en expansión a alta velocidad. Además, su compañera Gigante Roja, resulta siendo muy afectada por la explosión hasta el punto de ser destruida o en su defecto si sobrevive, saldría impulsada del sitio de la explosión por su desligue gravitatorio con respecto a su compañera destruida, presentando una velocidad de desplazamiento mayor a las de las estrellas cercanas, por lo que son denominadas Estrellas Fugitivas.

Durante la explosión de la supernova, se producen reacciones de nucleosíntesis, de las cuales se forma gran cantidad del isótopo inestable Niquel-56 (^{56}Ni), que se desintegra posteriormente en Cobalto-56 (^{56}Co) y finalmente en Hierro-56 (^{56}Fe).

El Sistema binario entre Enana Blancas, al presentar una masa total mayor al límite de Chandrasekhar (de 1,44 masas solares), generarían una *SN Ia*, luego que la enana de menor tamaño se disgregue a través de su órbita, formando una especie de toroide alrededor de la enana de mayor tamaño, la cual captaría dicho material a una gran velocidad, que luego de alcanzar y superar el límite de Chandrasekhar, inicia su explosión como supernova.

Las *SN Ib*, se caracterizan por presentar registro de Helio en su espectro, pero no el registro de Silicio cuando se acerca a su máximo brillo; y cuando llega a su etapa más avanzada, indica la presencia de elementos de masa intermedia como el Oxígeno y el Calcio. Este tipo de supernova, tienen su origen a partir de una Estrella Wolf-Rayet (estrellas hipergigantes variables

azules, muy grandes, masivas y brillantes, con más de 20–30 masas solares), que presentan la pérdida de su capa externa de Hidrógeno.

Las *SN Ic*, se caracterizan por no presentar Helio y Silicio en su espectro, pero cuando llega a una etapa más avanzada, indica la presencia de elementos de masa intermedia.

Este tipo de supernova, tienen su origen a partir una Estrella Gigante Roja, que presentan la pérdida de sus capas externas de Hidrógeno y Helio, quedando expuesto el núcleo de Carbono, a partir del cual se genera la explosión similar al proceso de las *Supernovas del tipo II*.

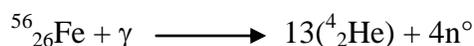
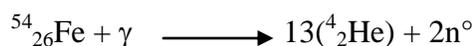
Las *Supernovas del tipo II (SN II)*, se generan a partir de estrellas masivas que presentan una masa mayor a 9 masas solares, las cuales en la etapa final de sus vidas se convierten en Estrellas Supergigantes Rojas. Estas, comienzan a formar en su interior un núcleo denso (1 millón de g/cm^3) y estable con una temperatura aproximada de 5.000 millones K, rico en Hierro, Níquel y otros isótopos cercanos a estos. A su vez, el núcleo se encuentra dentro de una capa de Silicio y ésta, sucesivamente entre otras capas formadas básicamente de Azufre, Oxígeno, Neón, Carbono, Helio e Hidrógeno.

Finalmente, el núcleo estelar (ferroso) deja de producir energía por reacciones nucleares. Sin embargo, el proceso de fusión nuclear, si continúa en la zona de separación entre la capa de Silicio y el núcleo, lo que permite la adición de más masa a éste. Como lo indican Bethe, H. y Brown, G.:

Una vez comenzada la fusión de núcleos de silicio prosigue a una velocidad vertiginosa, con lo que la masa del interior del núcleo alcanza el límite de Chandrasekhar en un día aproximadamente. Para este tipo de estrellas masivas, el límite de Chandrasekhar para su núcleo ferroso se encuentra entre 1,2 y 1,5 masas solares. (Bethe y Brown, 1985, p 101).

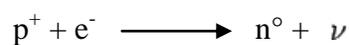
Al alcanzar y superar el núcleo de la estrella el límite de Chandrasekhar, se genera una gran inestabilidad, llevándolo a su colapso y al de toda la estrella. Todo esto sucede, debido a que el peso de la masa del núcleo vence la presión interna del mismo, inducida por los electrones que contiene y que se liberan. El núcleo comienza a presentar un gran aumento en la temperatura (3.000 millones K), posibilitando la emisión de fotones de alta energía que, al interactuar con los núcleos de Hierro, los pueden desintegrar en núcleos de Helio (partículas alfa) y en neutrones, por medio del proceso de fotodesintegración. Al seguir interactuando los fotones con las partículas alfa, se presenta un gran aumento de neutrones y la presencia de protones. Dichos procesos se pueden entender como los indica Alonso Sepúlveda:

Estos procesos de *fotodesintegración* tienen la forma:



Los anteriores son procesos endotérmicos, por lo que no permiten sostener el núcleo contra su propia gravitación; el núcleo sigue colapsándose y cada vez emite más neutrones. (Sepúlveda, 2014, p.135).

Otro proceso adicional que se presenta es la captura de electrones, que consiste en la interacción entre electrones con protones para transformarlos en neutrones y neutrinos.



Proceso que incrementa la concentración de neutrones y el flujo de neutrinos en el núcleo estelar.

De lo anterior, se genera disminución en la energía, la temperatura y por consiguiente la presión en el núcleo, acelerándose la contracción de éste; lo que conlleva a la caída o precipitación de las capas externas de la estrella hacia el núcleo, las cuales a su vez, se encuentran con un gran frente de fotones, neutrones y neutrinos que se desplazan hacia el exterior, generándose una onda de choque explosiva, en la que parte de la energía que llevan, es cedida a la materia que conforman las capas de la estrella, que a su vez son impulsadas al exterior, apreciándose una gran expulsión de materia y luminosidad, superior a la que la estrella generó durante todo su ciclo de vida.

Finalmente, tras la explosión, queda como resultado una gran nebulosa en expansión, rica en elementos químicos pesados y la estrella convertida en una Estrella de Neutrones o un Agujero Negro, de acuerdo con la masa adquirida por el núcleo, según límite de Chandrasekhar, que para

las Estrellas de Neutrones se estiman entre los 1,4 y 3 M_{Sol} ; y para los Agujeros Negros, masas mayores a 3 M_{Sol} .

En cuanto a las *Hipernovas* (*Super-Supernovas*), se origina a partir de estrellas hipergigantes, las cuales presentan masas superiores a las 140 masas solares. Estas, como lo indica Avishay Gal-Yam: “producen cantidades descomunales de elementos químicos y constituyen las explosiones más energéticas que la ciencia haya conocido” (Gal-Yam, 2012, p. 29).

Es así como las *Hipernovas*, presentan un proceso de colapso y explosión, semejante a la de las *Supernovas tipo II*, sólo que, no alcanza a fusionar núcleos de Silicio (Si) y de Hierro (Fe) y llegan hasta la etapa en que inician en su núcleo la fusión de Oxígeno (O). Estas debido a su gran masa, alcanzan en su interior temperaturas muy elevadas, como lo explica Gal-Yam:

Cuando la materia se calienta a temperaturas extremadamente elevadas, los núcleos atómicos o los electrones más veloces emiten rayos gamma, fotones de muy alta energía. Debido a la famosa ecuación de Albert Einstein que relaciona energía y masa, $E = mc^2$, cuando dos fotones muy energéticos chocan pueden convertirse en otras partículas; en concreto, pueden transformarse en un par consistente en un electrón y su antipartícula, el positrón. Cuando esto sucede, la mayor parte de la energía de los fotones iniciales queda almacenada en forma de materia. Esos electrones y positrones ejercen una presión mucho menor que los fotones a partir de los cuales se originaron: vienen a ser <<peso muerto>>. Por lo tanto, si en el núcleo de una estrella se alcanzan tales condiciones, su presión

disminuirá de repente, como si el astro hubiese abierto una válvula de escape. En las fases previas, es justo la presión lo que impide que la estrella colapse por efecto de su propio peso; ahora, sin embargo, el núcleo del astro se torna inestable y comienza a contraerse con rapidez. (Gal-Yam, 2012, p. 27).

Tras lo anterior, se genera una gran explosión, liberando una gran cantidad de energía que calienta el interior de la estrella provocando que consuma en cuestión de minutos todo su Oxígeno, sintetizando una gran cantidad de elementos químicos pesados. Finalmente, toda la estrella se destruye, quedando una gran nebulosa en expansión, rica en elementos químicos.

Y con respecto a las *Kilonovas (Macronovas y/o Supernovas de tipo r)*, por su parte se forman a partir de la colisión y fusión de dos Estrellas de Neutrones o de una Estrella de Neutrón con un Agujero Negro, cuando estas hacen parte de un sistema binario. Durante su fusión o “coalescencia” (Zuluaga, 2016) emiten gran cantidad de radiación electromagnética (en especial rayos gamma) y de ondas gravitacionales, siendo un evento superior a la explosión de Supernovas e Hipernovas. Lo cual se puede comprender, a través de lo que explica Jorge Zuluaga:

Se calcula por ejemplo que en la coalescencia de los dos agujeros negros que observó LIGO en septiembre de 2015, se produjo tanta energía en ondas gravitacionales que si pudiéramos convertir en luz esa energía, el choque habría sido más luminoso que todas las estrellas del universo observable juntas, al menos durante las decenas de milisegundos que duró (Zuluaga, 2016).

La sigla LIGO corresponde a: Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory.

Algo muy interesante de la colisión de Estrellas de Neutrones, además de la generación de las Ondas Gravitacionales, es que, de acuerdo con las nuevas investigaciones, son generadores de una gran cantidad de elementos químicos pesados, como el Oro (Au), Platino (Pt) y Uranio, entre otros; tras lo que nos indica Jorge Zuluaga en su artículo sobre las Ondas Gravitacionales que:

Según los estimativos, del choque de dos estrellas de neutrones idénticas podría emerger un "caldo" rico en elementos más pesados que el hierro que sumaría en total más de 10 veces la masa de Júpiter. En ese caldo habría fácilmente una cantidad de uranio, por ejemplo, tan grande como toda la masa de la Tierra. El platino y el oro podrían sumar juntos el equivalente a 10 veces la masa de nuestro planeta.

Hasta hace unos años las explosiones de supernova, que son fenómenos relativamente frecuentes en la Galaxia (en promedio 1 o 2 cada siglo), se consideraban los calderos de todos los elementos más pesados que el hierro. Sin embargo, los procesos nucleares capaces de crear algunos de los elementos más pesados, conocidos técnicamente como "procesos de captura rápida de neutrones", se producirían en las supernovas en condiciones muy diferentes a las necesarias para explicar la abundancia observada en el sistema solar de estos mismos elementos. (Zuluaga, 2016).

Tras conocer los procesos que generan y se producen en la explosión de Estrellas Supernovas, se puede comprender su relación con el origen de los elementos químicos más pesados, que requieren de unas condiciones especiales para la formación o síntesis de sus

núcleos. Los cuales presentan, además, una mayor repulsión eléctrica entre los protones que se acercan para conformar los núcleos más pesados. Es aquí donde, las condiciones energéticas, térmicas y de abundancia de partículas como los neutrones, que se liberan en la explosión de una Supernova, posibilitan la síntesis de los nuevos elementos.

Mientras la onda de choque explosiva de fotones, neutrones y neutrinos que sale expulsada del núcleo de la estrella, choca e interactúa violentamente con las diferentes capas de elementos de la estrella, se producen rápidamente reacciones de nucleosíntesis por fusión de núcleos y por captura de neutrones, por medio del conocido *Proceso-r*, que es fundamental en la conformación de elementos más pesados.

El Proceso-r

Este proceso comienza cuando en el núcleo de la estrella se genera una gran inestabilidad y se inician una serie de reacciones termonucleares, que comienzan con un gran aumento en la temperatura (3.000 millones K), posibilitando la emisión de fotones de alta energía, que al interactuar con los núcleos de Hierro (Fe), dan inicio al Proceso de Fotodesintegración de estos, emitiendo gran cantidad de partículas alfa (núcleos de Helio), de neutrones y de protones.

Otro proceso adicional que se presenta es la captura de electrones, que consiste en la interacción entre electrones con protones para transformarlos en neutrones y neutrinos.



Proceso que incrementa la concentración de neutrones y el flujo de neutrinos en el núcleo estelar. Durante dichos procesos se obtienen densidades de neutrones aproximados entre los 10^{20} y los $10^{25} \text{ n}^\circ/\text{cm}^3$, con temperaturas del orden de los 10^9 K .

Ahora, durante la explosión de la supernova, los núcleos de elementos como el Hierro (Fe), abundantes en el núcleo de la estrella, logran capturar rápidamente una gran cantidad de neutrones, desde el Hierro-56 hasta alcanzar un Número Másico $A = 68$, Hierro-68 (${}_{26}\text{Fe}^{56}$, ${}_{26}\text{Fe}^{57}$, ${}_{26}\text{Fe}^{58} \dots {}_{26}\text{Fe}^{68}$), valor ante el cual, el núcleo no admite la captura de más neutrones y entra en el llamado “punto de espera”, permitiendo en dicho instante que se presente la desintegración β^- , formándose un isótopo de un elemento más pesado nuevo, Cobalto (${}_{27}\text{Co}^{68}$). Éste a su vez, reinicia la captura de neutrones, alcanzando isótopos hasta el Cobalto-71 (${}_{27}\text{Co}^{71}$), con el cual alcanza otro cese y presenta una desintegración β^- , formando Níquel-71 (${}_{28}\text{Ni}^{71}$). Proceso que puede ser visualizado de forma esquemática en la Figura 13.

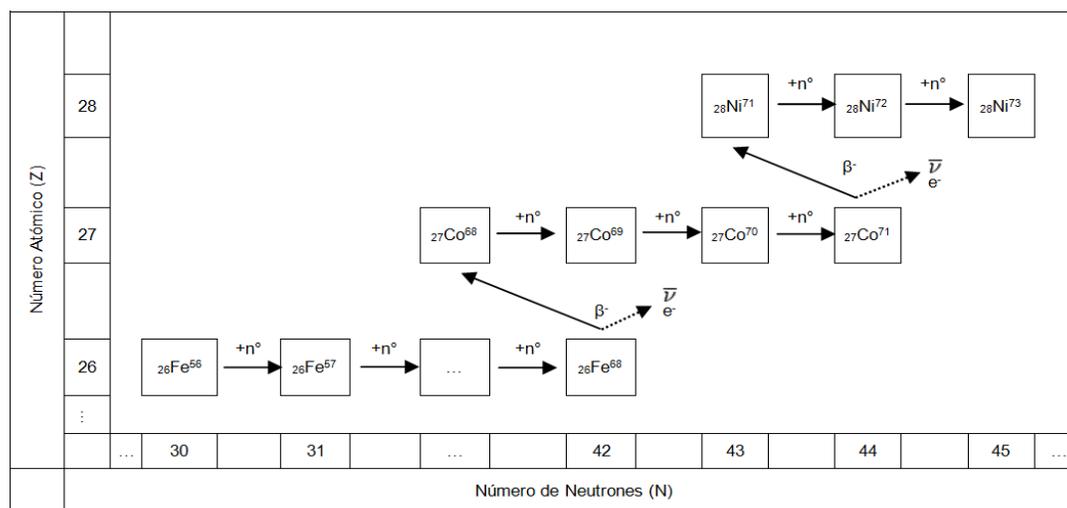
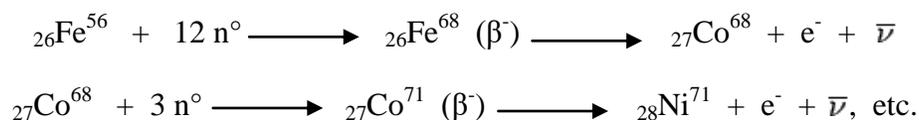


Figura 13: Proceso-r, secuencia de captura de neutrones a partir del Hierro (Fe) hasta el Níquel (Ni).

Fuente: Elaboración propia, a partir de la figura presentada por Kenneth Krane. (1987). *Introductory Nuclear Physics*. pp. 777. Recuperado de <http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf>

Igualmente, este proceso ilustrado en la figura anterior se puede indicar a través de la siguiente secuencia de reacciones:



Otro ejemplo del Proceso-r que se puede describir, es el de la síntesis del Oro (Au), a partir del Iterbio (Y), pasando por el Lutecio (Lu), el Hafnio (Hf) y así sucesivamente hasta el Platino (Pt) y finalmente el Oro (Au), del cual puede seguir el proceso, como se aprecia en la Figura 14.

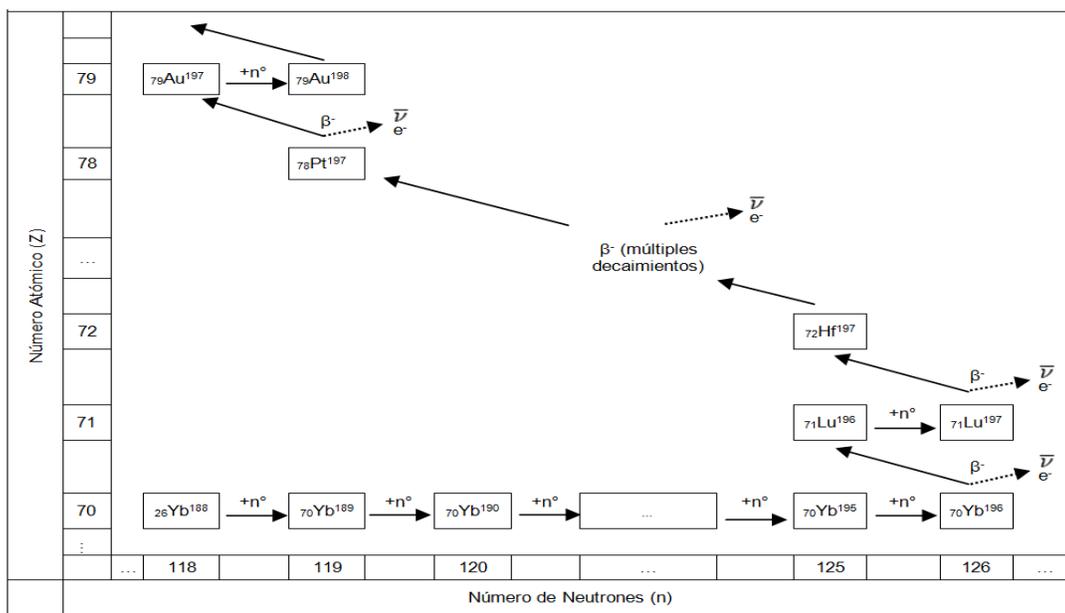


Figura 14: Proceso-r, secuencia de captura de neutrones a partir del Iterbio (Yb) hasta el Oro (Au).

Fuente: Elaboración propia, a partir de la figura realizada por Mafalda Martins de la ESO, presentada en el artículo de Rebusco, P., Boffin, H. and Pierce-Price, Douglas. (2007). Fusion in the universe: where your jewellery comes from. *Science in School*, (5), pp. 53. Recuperado de http://www.scienceinschool.org/sites/default/files/teaserPdf/issue5_fusion.pdf

Tras los anteriores procesos observados, la captura de neutrones puede continuar, hasta alcanzar otro punto de espera, con desintegraciones β^- alternadas, hasta lograr sintetizar otros isótopos de elementos cada vez más pesados, algunos con isótopos inestables radiactivos, que van a presentar particularmente un exceso de neutrones, como se aprecia en los elementos pesados hasta el Torio (Th) y el Uranio (U).

De igual forma, como en el Proceso-s, durante el Proceso-r se presentan los llamados “Números Mágicos” que corresponden a núcleos atómicos de elementos pesados en equilibrio que presentan cierta abundancia. Dichos Números Mágicos con $N = 50$ ($A \sim 80$), corresponde a elementos como Selenio (Se) y Kriptón (Kr); $N = 82$ ($A \sim 130$), para elementos como Telurio (Te), Terbio (Tb) y Xenón (Xe); y $N = 126$ ($A \sim 195$), para elementos como Osmio (Os), Iridio (Ir) y Platino (Pt).

Finalmente, la explosión de Supernovas, son eventos muy importantes en el Universo porque permiten que los elementos que se forman durante la explosión y los que se han formado durante todo su ciclo de vida, acumulados en sus capas externas, se dispersen a gran velocidad por el espacio, enriqueciendo el medio interestelar, donde se formarán nuevas estrellas y a su alrededor planetas.

En general en los diferentes tipos de explosiones estelares como: Supernovas, Hipernovas y Kilonovas, se logran sintetizar básicamente los siguientes elementos químicos: Aluminio (Al), Silicio (Si), Titanio (Ti), Vanadio (V), Hierro (Fe), Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Zinc (Zn), Galio (Ga), Germanio (Ge), Selenio (Se), Bromo (Br), Kriptón (Kr), Rubidio (Rb), Estroncio (Sr), Itrio (Y), Zirconio (Zr), Niobio (Nb), Molibdeno (Mo), Tecnecio (Tc), Rutenio

(Ru), Rodio (Rh), Paladio (Pd), Plata (Ag), Cadmio (Cd), Indio (In), Estaño (Sn), Antimonio (Sb), Telurio (Te), Yodo (I), Xenón (Xe), Cesio (Cs), Bario (Ba), Lantano (La), Cerio (Ce), Praseodimio (Pr), Neodimio (Nd), Prometio (Pm), Samario (Sm), Europio (Eu), Gadolinio (Gd), Terbio (Tb), Disproso (Dy), Holmio (Ho), Erblio (Er), Tulio (Tm), Iterbio (Yb), Lutecio (Lu), Hafnio (Hf), Tantalio (Ta), Tungsteno (W), Renio (Re), Osmio (Os), Iridio (Ir), Platino (Pt), Oro (Au), Mercurio (Hg), Talio (Tl), Plomo (Pb), Bismuto (Bi), Polonio (Po), Astató (At), Radón (Rn), Francio (Fr), Radio (Ra), Actinio (Ac), Torio (Th), Protactinio (Pa) y Uranio (U).

3.1.4.4. Nucleosíntesis interestelar

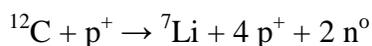
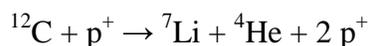
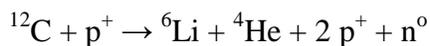
La Nucleosíntesis Interestelar se da a través de la descomposición, desintegración o fisión de núcleos de elementos más pesados, previamente formados en estrellas y supernovas, que han quedado dispersos por el espacio, para descomponerse o desintegrarse luego, en núcleos más livianos, debido a la interacción de Radiación Cósmica (Spallation), Desintegración Radiactiva y la Fisión Nuclear.

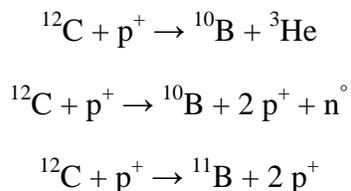
Mediante el proceso por Radiación Cósmica o Síntesis por Spallation (traducido como Astillamiento), como ya se mencionó en la Sección 3.1.2.9., se logran sintetizar núcleos de elementos químicos livianos como son: Litio (Li), Berilio (Be) y Boro (B), que han sido nombrados por algunos científicos con el acrónimo LiBeB. Aunque se conoce que el ${}^7_3\text{Li}$, en un porcentaje muy bajo proviene desde los primeros 4 minutos del Big Bang, los otros isótopos como ${}^6_3\text{Li}$, ${}^9_4\text{Be}$, ${}^{10}_5\text{B}$ y ${}^{11}_5\text{B}$, se deben haber producido por medio de este proceso interestelar. Como lo expone Alonso Sepúlveda:

Una clave al origen de LiBeB radica en que, en los rayos cósmicos, estos elementos son un millón de veces más abundantes que en el sistema solar. Para explicar su existencia se proponen mecanismos como reacciones de fragmentación del Fe, del C y del O, entre otros, mediante el bombardeo con protones de alta energía, que podría provenir de la radiación cósmica o ser acelerados por campos magnéticos estelares intensos.

Estas reacciones ocurren a energías mucho más altas que aquellas características del *big bang* y de la evolución estelar, pero en un ambiente de muy baja densidad como en las inmensas nubes de gas y polvo presentes en el medio interestelar. Allí la temperatura es baja y el LiBeB producido no se consume después de su formación, como lo haría en un interior estelar. (Sepúlveda, 2014, p. 153).

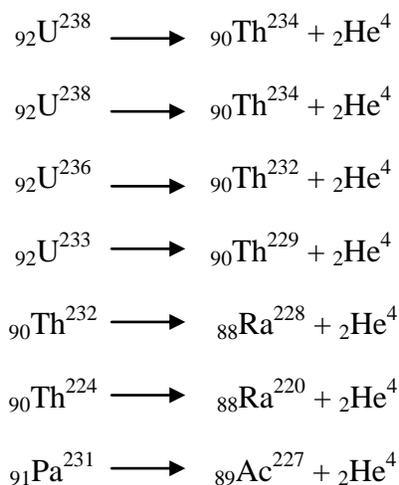
A continuación, se presenta una secuencia de reacciones de Radiación Cósmica, por medio de las cuales se forman isótopos del Litio (Li), el Berilio (Be) y el Boro (B) a partir del Carbono (C):





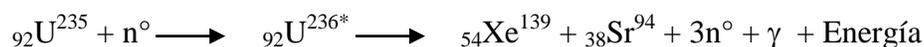
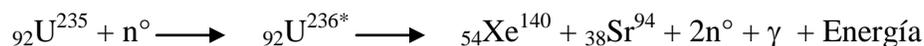
Además, mediante este proceso también se logra explicar la formación y abundancia de algunos elementos pesados como el Lantano (La), Tantalio (Ta), Wolframio (W), Platino (Pt) y Mercurio (Hg).

A través de la Desintegración Radiactiva Natural o Emisión α , como ya se mencionó en la Sección 3.1.2.7., se presenta en isótopos de elementos pesados e inestables, conocidos como radioisótopos o isótopos radiactivos, como el Uranio (U), Torio (Th), Radio (Ra), Radón (Rn) y Polonio (Po), entre otros, los cuales por su inestabilidad nuclear emiten partículas α (núcleos de Helio-4), descomponiéndose en otros isótopos de menor números atómico, que pueden ser de igual forma inestables, continuando con el proceso de desintegración radiactiva o terminar en un isótopo estable. A continuación, se presenta una secuencia de reacciones representativa de éste proceso:





En cuanto a la Fisión Nuclear, al igual que la Emisión α , se presenta en algunos isótopos de elementos pesados e inestables como: Uranio (U), Torio (Th), Radio (Ra), Radón (Rn) y Polonio (Po); el cual, como ya se explicó en la Sección 3.1.2.5., ocurre por la interacción de un neutrón (n°) sobre el núcleo atómico del isótopo, provocando su fragmentación en dos nuevos núcleos de menor número atómico, con la liberación de dos o tres neutrones, rayos gamma (γ) y energía. Los neutrones liberados, pueden actuar sobre otros núcleos atómicos, generando una reacción en cadena de Fisión. Una reacción típica de fisión nuclear es la que presenta el Uranio-235, como se indica en las siguientes ecuaciones químicas:



Así podemos comprender que, muchos elementos químicos que se encuentran esparcidos en el espacio o hacen parte de la estructura del Sistema Solar y en especial de la Tierra, tienen parte de su origen en una menor abundancia, mediante este proceso.

Finalmente, ante los procesos de Nucleosíntesis presentados en este capítulo que explican el origen de los elementos químicos en el Universo, se recomienda visitar el Sitio Web: “*Tabla Periódica con el Origen de los Elementos Químicos Estables en la Naturaleza*” en el enlace o link: <http://urania.udea.edu.co/users/jlara/>, que es un producto digital interactivo que complementa el contenido teórico de éste trabajo; y en la cual, se pueden encontrar para cada elemento químico, las reacciones de nucleosíntesis mediante las cuales éstos se originan, al igual que otras informaciones como: datos básicos, imágenes representativas, isótopos estables, distribución y abundancia en el Universo, el Sol, la Tierra y el cuerpo humano y su importancia para la vida.

4. Productos obtenidos

4.1. Tabla periódica digital interactiva con el origen de los elementos químicos

Tras la investigación realizada sobre “El Origen Astrofísico y Cosmológico de los Elementos Químicos”, presentado en los capítulos anteriores en cuanto a los procesos de Nucleosíntesis Primordial, Estelar, Explosiva e Interestelar, con respecto a los 92 elementos más estables y presentes en la naturaleza, se ha recopilado y procesado una importante cantidad de información, la cual será presentada y divulgada al público en general, como un recurso científico y educativo.

Para organizar y dar a conocer dicha información como un producto adicional de este trabajo de investigación, se ha determinado incursionar en el campo digital, con un Recurso o Contenido Multimedia, haciendo uso de las nuevas Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC), que permiten utilizar una gran variedad de herramientas para la recolección, registro, procesamiento, transmisión y recepción de información, como computadores, software e Internet, posibilitando su aplicación en muchas áreas del conocimiento, de la investigación, los negocios y el entretenimiento, en campos tanto científicos, educativos, sociales, económicos, políticos, culturales, deportivos y artísticos, entre muchos otros, permitiendo un mejor procesamiento de la información, mayor rapidez y cobertura de su transmisión de forma global y en tiempo real.

Este trabajo tiene su aporte dirigido al campo de las Ciencias Naturales, más específicamente a la Astronomía, la Astrofísica y la Química, con proyección a la Educación, tanto a nivel escolar de la básica secundaria y media, como a nivel universitario y público en general, que se interese en el tema.

En el campo de la Ciencia, las TIC, se han posicionado como un excelente medio e instrumento para su desarrollo, sus avances, procesos de investigación y divulgación, ante la misma comunidad científica y público en general. Las TIC, han puesto la Ciencia y la Tecnología al alcance de todos. Convirtiéndose en la actualidad, tal como lo expresa Ester Schiavo, en herramientas fundamentales para la investigación científica y tecnológica. Además, dice:

Usar las TIC como herramientas suele ser útil para acelerar procesos y, en consecuencia, disminuir el tiempo de dedicación a los mismos. También sirve para organizar las diversas actividades e interactuar en el espacio-tiempo que estas tecnologías generan, lugar donde la distancia no existe y el tiempo es continuo. Todo ello facilita enormemente el trabajo de los equipos de investigación, más aún cuando se encuentran dispersos geográficamente. (Schiavo, 2007, p. 96).

Además, las TIC permiten un mayor almacenamiento de datos e información, agilizando el procesamiento y la verificación de resultados en investigaciones, a través de software y/o programas cada vez más avanzados, al igual que su divulgación o publicación en revistas virtuales y sitios web especializados con acceso a todo tipo de público. Al igual que:

En la investigación científica, el uso de las TIC's se evidencia con las consultas que el investigador realice en diversos buscadores en Internet, así como también en el establecimiento y participación de grupos o comunidades científicas a través de foros virtuales, conformando lo que se denomina una comunidad científica, facilitándose el intercambio de avances, ideas y bibliografías de un tema específico. (Acosta y Martín, 2009, p. 26).

En cuanto a la Educación, las TIC se han convertido en herramientas muy útiles, de apoyo didáctico, que facilitan y hacen más dinámico los procesos de enseñanza-aprendizaje. Cuentan además con una gran variedad de herramientas tecnológicas y virtuales como los Portales, Página Web, Blog y Aplicaciones, con las que se puede lograr la interacción, la interactividad y la participación de los usuarios, docentes y estudiantes. Es importante resaltar que la enseñanza a partir de Contenidos Multimedia facilita y permite generar un acceso rápido a una gran cantidad de información en todas las áreas del conocimiento. Siendo así, importante asumir que:

En lo que respecta a la enseñanza, la multimedia ha sido de gran utilidad, ya que, al estimular la vista, el oído, el tacto y la mente, se logra un aprendizaje más rápido y sencillo, cuestión que ha sido tomada en cuenta por algunas editoriales dedicadas a la elaboración y venta de libros interactivos y otros productos multimedia para estudiantes, desde nivel preescolar hasta nivel universitario, los cuales abordan temas que a veces no suelen ser tan fáciles de comprender por los alumnos. También es muy usual en versiones multimedia de enciclopedias, así como para la enseñanza de idiomas. (Méndez, Ruiz y Figueroa, 2007, p. 5).

Por tal motivo, con el Recurso o Contenido Multimedia que se propone en este trabajo, se busca en principio mejorar la enseñanza de las ciencias naturales y a futuro romper con el esquema tradicional de enseñanza que aún perdura en las aulas de clase. Se encuentra así, que la implementación de Contenidos Multimedia permite comprender los conceptos de las Ciencias Naturales de una forma profunda, analítica y reflexiva; al igual que, permite trabajar y lograr la transversalidad en muchas áreas de formación académica, garantizando una educación más integra y pertinente con el ser, el saber y el saber hacer, para una mejor calidad de la Educación.

Dicho Recurso o Contenido Multimedia propuesto en este trabajo, se ha consolidado en una Tabla Periódica Digital Interactiva, en la que se conserva el diseño o formato tradicional de la Tabla Periódica de los Elementos Químicos, como se conoce en la actualidad, en cuanto a su estructura o distribución periódica de los elementos, tal como la planteó Dimitri Mendeleïev y posteriormente reorganizó Glenn T. Seaborg.

En la elaboración o construcción de dicha Tabla Periódica Digital, se utilizó el lenguaje informático HTML (HyperText Markup Language), el cual mediante una secuencia de códigos permite el desarrollo o estructuración de páginas Web, incorporando textos, imágenes, videos, gráficos, tablas, cuadros y vínculos entre otros elementos y acciones. Además, en cuanto a este lenguaje, según María Jesús Lamarca L., nos aclara que:

El lenguaje de marcas de hipertexto, HTML o (HyperText Markup Language) se basa en el metalenguaje SGML (*Standard Generalized Markup Language*) y es el formato de los documentos de la World Wide Web (WWW). El World Wide Web Consortium (W3C) es la organización que desarrolla los estándares para

normalizar el desarrollo y la expansión de la Web y la que publica las especificaciones relativas al lenguaje HTML. (Lamarca, 2013, párr. 1).

Para la edición de páginas web con lenguaje HTML, se puede trabajar mediante cualquier editor de texto como el block de notas en Windows, TextEdit en Mac y en Linux. Pero además existen otros programas editores de HTML, diseñados específicamente para desarrollar páginas web, como lo son: TextWrangler, Brackets, CoffeeCup Free Editor, Aptana Studio, Notepad++, Kompozer, Microsoft Visual Studio for Web, JetBrains Webstorm, Netbeans, TextMate, BlueGriffon, HTML-Kit y Sublime Text, entre otros. Para la edición de la Tabla Periódica, se ha utilizado el programa Sublime Text 2, por su versatilidad y fácil manejo.

Los archivos editados en lenguaje HTML se leen o son visualizados en navegadores web, tales como, Internet Explorer, Google Chrome, Mozilla Firefox, Safari y Opera, entre otros. Además, cabe anotar que, debido a la variedad de los formatos que maneja cada navegador web, la presentación o apariencia de la página elaborada puede variar en algunos aspectos. Por lo que es aconsejable realizar visualizaciones de prueba de las páginas a través de los diferentes navegadores, para conocer cómo se ejecuta antes de ser subida a la red.

Para dar una mejor orientación en cuanto a la información que esta Tabla Periódica Digital proporciona a quienes la consulten, se ha especificado su nombre como “*Tabla Periódica con el Origen de los Elementos Químicos*”, puesto que como ya se mencionó, centra su contenido de información con respecto al origen de los elementos químicos y no en presentar

datos e información sobre las propiedades químicas y físicas de los elementos, como se puede encontrar en otras tablas periódicas digitales e impresas.

Esta *Tabla Periódica con el Origen de los Elementos Químicos*, cuenta con una página principal, donde a través de una estructura de tabla periódica tradicional, se visualizan básicamente los 92 elementos químicos que se han abordado en la investigación, a través de celdas o recuadros, como se muestra a continuación.

TABLA PERIÓDICA CON EL ORIGEN DE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS ESTABLES EN LA NATURALEZA

¹ H Hidrógeno Z=1																	⁴ He Helio Z=2						
⁷ Li Litio Z=3	⁹ Be Berilio Z=4	<div style="display: flex; justify-content: space-around; font-size: small;"> Nucleosíntesis Primordial y por Radiación Cósmica Nucleosíntesis Primordial y por Radiación Cósmica Nucleosíntesis Estelar en Estrellas de Baja Masa y Gran Masa Nucleosíntesis Estelar en Estrellas de Gran Masa Nucleosíntesis Estelar en Estrellas de Gran Masa y Supernovas Nucleosíntesis Explosiva en Supernovas </div>										¹¹ B Boro Z=5	¹² C Carbono Z=6	¹⁴ N Nitrógeno Z=7	¹⁶ O Oxígeno Z=8	¹⁹ F Fluor Z=9	²⁰ Ne Neón Z=10						
²³ Na Sodio Z=11	²⁴ Mg Magnesio Z=12																	²⁷ Al Aluminio Z=13	²⁸ Si Silicio Z=14	³¹ P Fósforo Z=15	³² S Azufre Z=16	³⁵ Cl Cloro Z=17	⁴⁰ Ar Argón Z=18
³⁹ K Potasio Z=19	⁴⁰ Ca Calcio Z=20	⁴⁵ Sc Escandio Z=21	⁴⁵ Ti Titanio Z=22	⁵¹ V Vanadio Z=23	⁵² Cr Cromo Z=24	⁵⁵ Mn Manganeso Z=25	⁵⁶ Fe Hierro Z=26	⁵⁹ Co Cobalto Z=27	⁵⁸ Ni Níquel Z=28	⁶³ Cu Cobre Z=29	⁶⁴ Zn Zinc Z=30	⁶⁹ Ga Galio Z=31	⁷⁴ Ge Germanio Z=32	⁷⁵ As Arsénico Z=33	⁸⁰ Se Selenio Z=34	⁷⁹ Br Bromo Z=35	⁸⁴ Kr Kriptón Z=36						
⁸⁵ Rb Rubidio Z=37	⁸⁸ Sr Estroncio Z=38	⁸⁹ Y Ytrio Z=39	⁹⁰ Zr Zirconio Z=40	⁹³ Nb Níobio Z=41	⁹⁸ Mo Molibdeno Z=42	⁹⁸ Tc Tecnecio Z=43	¹⁰² Ru Rutenio Z=44	¹⁰³ Rh Rodio Z=45	¹⁰⁶ Pd Paladio Z=46	¹⁰⁷ Ag Plata Z=47	¹¹⁴ Cd Cadmio Z=48	¹¹⁵ In Indio Z=49	¹²⁰ Sn Estado Z=50	¹²¹ Sb Antimonio Z=51	¹³⁰ Te Telurio Z=52	¹²⁷ I Yodo Z=53	¹³² Xe Xenón Z=54						
¹³³ Cs Cesio Z=55	¹³⁸ Ba Bario Z=56	¹³⁹ La Lantano Z=57	¹⁸⁰ Hf Hafnio Z=72	¹⁸¹ Ta Tantalio Z=73	¹⁸⁴ W Wolframio Z=74	¹⁸⁷ Re Renio Z=75	¹⁹² Os Osmio Z=76	¹⁹³ Ir Iridio Z=77	¹⁹⁵ Pt Platino Z=78	¹⁹⁷ Au Oro Z=79	²⁰² Hg Mercurio Z=80	²⁰⁵ Tl Talio Z=81	²⁰⁸ Pb Plomo Z=82	²⁰⁹ Bi Bismuto Z=83	²⁰⁹ Po Polonio Z=84	²¹⁰ At Astatina Z=85	²²² Rn Radón Z=86						
²²³ Fr Francio Z=87	²²⁶ Ra Radio Z=88	²²⁷ Ac Actinio Z=89																					
Lantánidos			¹⁴⁰ Ce Cerio Z=58	¹⁴¹ Pr Praseodimio Z=59	¹⁴² Nd Neodimio Z=60	¹⁴⁵ Pm Prometio Z=61	¹⁵² Sm Samario Z=62	¹⁵³ Eu Europio Z=63	¹⁵⁸ Gd Gadolinio Z=64	¹⁵⁹ Tb Terbio Z=65	¹⁶⁴ Dy Disprosio Z=66	¹⁶⁵ Ho Holmio Z=67	¹⁶⁶ Er Erbio Z=68	¹⁶⁹ Tm Tulio Z=69	¹⁷⁴ Yb Yterbio Z=70	¹⁷⁵ Lu Lutecio Z=71							
Actínidos			²³² Th Torio Z=90	²³¹ Pa Protactinio Z=91	²³⁸ U Uranio Z=92																		

Elaborado por Jorge Ignacio Lara Mejía, Mag. en Ciencias Naturales y Matemáticas.
Dirigido por Jorge Iván Zuluaga Callejas, PhD Astrofísica.
2018

Figura 15: Tabla periódica con el origen de los elementos químicos en la naturaleza.

Las celdas o recuadros de cada elemento químico, se encuentran bajo un código de colores que especifica el proceso de nucleosíntesis mediante el cual cada elemento químico ha tenido su origen en el universo, así: Azul: Nucleosíntesis Primordial; Verde: Nucleosíntesis por Radiación Cósmica; Amarillo: Nucleosíntesis Estelar, en estrellas de baja y gran masa; Naranja:

Nucleosíntesis Estelar, en estrellas de gran masa; Rojo: Nucleosíntesis Estelar, en estrellas de gran masa y supernovas; y Violeta: Nucleosíntesis Explosiva o en supernovas.

Nucleosíntesis Primordial o Primigenia	Nucleosíntesis Primordial y por Radiación Cósmica	Nucleosíntesis Estelar en Estrellas de Baja Masa y Gran Masa	Nucleosíntesis Estelar en Estrellas de Gran Masa	Nucleosíntesis Estelar en Estrellas de Gran Masa y Supernovas	Nucleosíntesis Explosiva o en Supernovas
--	---	--	---	---	--

Figura 16: Código de colores según el tipo de Nucleosíntesis para los elementos químicos en la Tabla Periódica Digital Interactiva.

En cada celda, se especifica para cada elemento químico información básica para su identificación, como: Símbolo del Elemento, antecedido por un número exponente que hace referencia del Número Másico de su isótopo más abundante y estable (Ejemplo ^{12}C); el Nombre del Elemento y el Número Atómico (Z) correspondiente.

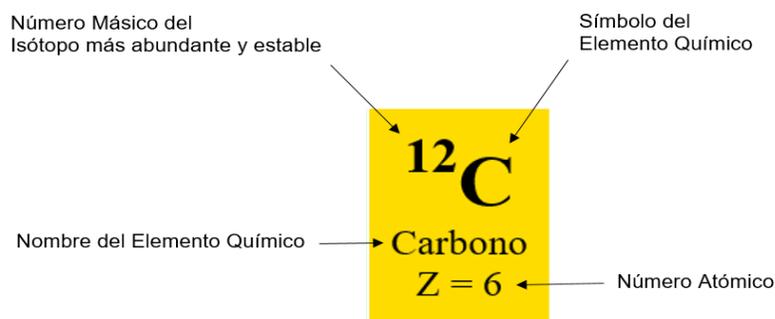


Figura 17: Ejemplo de la información básica de cada elemento químico por celda en la Tabla Periódica Digital Interactiva.

Al hacer clic, en cualquiera de los Elementos Químicos (al interior de su celda), se abre una página nueva con información correspondiente al elemento seleccionado en cuanto a:

- Datos Básicos: (símbolo, número atómico y masa atómica);
- Imágenes Representativas;
- Isótopos Estables;
- Origen en el Universo (reacciones de nucleosíntesis);
- Distribución y Abundancia (en el Universo, en el Sol, en la Tierra y en el Cuerpo Humano);
- Importancia para la Vida;
- Enlaces Externos y
- Referencias Bibliográficas.

A su vez, esta Tabla Periódica se encontrará instalada en el enlace o link:

<http://urania.udea.edu.co/users/jlara/>

A continuación, se presenta un ejemplo representativo con respecto al elemento Hidrógeno, donde se puede apreciar la información que se puede encontrar de cada elemento en la tabla periódica digital, tal como se puede visualizar en la página Web al ser visitada.

HIDRÓGENO

Datos Básicos:

Símbolo: H

Número Atómico: $Z = 1$

Masa Atómica: 1,00794 u

Imágenes Representativas:

Nebulosa NGC 604 en la Galaxia del Triángulo (M 33), con gran abundancia de Hidrógeno¹

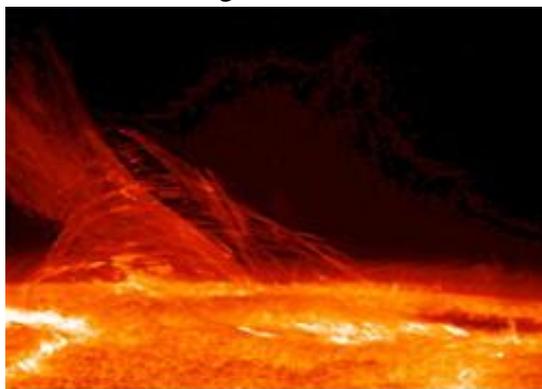


¹Imagen tomada de Wikipedia,

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7a/Nursery_of_New_Stars_-_GPN-2000-000972.jpg/230px-Nursery_of_New_Stars_-_GPN-2000-000972.jpg

¹Imagen tomada de Wikipedia, <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno>

Hidrógeno en el Sol²



²Imagen tomada de Webelements, <https://www.webelements.com/hydrogen/>

Combustión de Hidrógeno en la explosión del Dirigible Hindenburg³



³Imagen tomada de Webelements, <https://www.webelements.com/hydrogen/>

Espectro del Hidrógeno⁴



⁴Imagen tomada de Webelements, <https://www.webelements.com/hydrogen/>

Isótopos Estables:

¹H (Protio): Número Másico: A = 1; Abundancia: 99,9885 %

²H (Deuterio): Número Másico: A = 2; Abundancia: 0,115 %

³H (Tritio): Número Másico: A = 3; Abundancia: * %

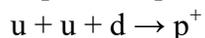
Origen en el Universo:

El Hidrógeno se originó en el universo desde la nucleosíntesis primordial o primigenia, entre los 3 primeros minutos después del Big Bang; el Protio tiene su origen a partir de los protones que se formaron de los quarks up (u) y down (d) y del decaimiento de neutrones libres; el Deuterio de la fusión de un protón con un neutrón y el Tritio de la fusión de dos Deuterios.

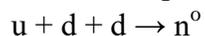
A continuación se presentan las reacciones de nucleosíntesis correspondientes a la formación de los isótopos del Hidrógeno:

Síntesis del Protio:

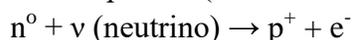
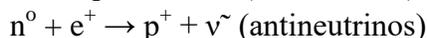
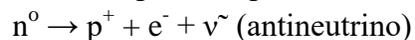
Formación del protón a partir de quarks:



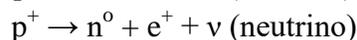
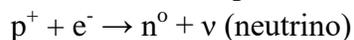
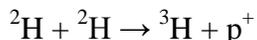
Formación del neutrón a partir de quarks:



Formación del protón a partir del neutrón:



Formación del neutrón a partir del protón:

**Síntesis del Deuterio:****Síntesis del Tritio:****Distribución y Abundancia:**

En el Universo, es el elemento con mayor abundancia, alcanzando una cantidad de 75% en masa del universo y aproximadamente 93% en número de átomos del universo. Se encuentra básicamente en nebulosas, estrellas y planetas gaseosos, en forma atómica, molecular (H_2) y en estado de plasma.

En el Sol, es el elemento con mayor abundancia, alcanzando una cantidad de 75% en masa del Sol y aproximadamente 93% en número de átomos del Sol.

En la Tierra, alcanza una cantidad de 0,15% en masa de la corteza y aproximadamente 3,1% en número de átomos. El Hidrógeno a condiciones ambientales se encuentra en estado molecular (H_2) en poca cantidad y conformando compuestos químicos, ocupando por abundancia en la Tierra el puesto número 15.

En el Cuerpo Humano, alcanza una cantidad de 10% en masa del cuerpo y aproximadamente 62% en número de átomos.

Importancia para la Vida:

El hidrógeno es un elemento esencial para la vida, componente del agua, la materia orgánica y de casi todas las moléculas de los seres vivos. Además, lo encontramos en los azúcares, almidones, proteínas y grasas. Sin embargo, el hidrógeno en sí mismo no desempeña un papel particularmente activo. Permanece unido a átomos de carbono y oxígeno, mientras que la química de la vida tiene lugar en los sitios más activos que incluyen, por ejemplo, oxígeno, nitrógeno y fósforo.

La mayor cantidad del Hidrógeno en la Tierra, se encuentra conformando compuestos orgánicos de importancia para la vida como carbohidratos, lípidos, vitaminas, ácidos nucleicos (ADN y ARN), aminoácidos y proteínas, entre otros.

Enlaces Externos:

Hidrógeno. Wikipedia (Enlace)
 Hidrógeno. Webelements (Enlace)
 Hidrógeno. Lenntech (Enlace)
 Importancia del hidrógeno (Enlace)
 Hidrógeno. rsc (Enlace)
 Hidrógeno. uaeh (Enlace)
 Abundancia de los Elementos. Webelements (Enlace)

Referencias Bibliográficas:

Abundancias de los Elementos. Recuperada de:
https://www.webelements.com/periodicity/abundance_universe
 Importancia del hidrógeno. Recuperada de <https://www.importancia.org/hidrogeno.php>
 Hidrógeno. Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno>
 Hidrógeno. Recuperado de <https://www.webelements.com/hydrogen/>
 Hidrógeno. Recuperado de <http://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>
 Hidrógeno. Recuperado de <http://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen>
 Hidrógeno. Recuperado de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa2/n2/e2.html>
 Oligoelementos. Recuperado de <https://es.wikipedia.org/wiki/Oligoelemento>

Créditos:

Elaborado por Jorge Ignacio Lara Mejía, Mag. en Ciencias Naturales y Matemáticas.
 Dirigido por Jorge Iván Zuluaga Callejas, PhD Astrofísica.
 2018

4.2. Recursos pedagógicos para la enseñanza del origen cosmológico de los elementos químicos

Proyectar al aula de clase la investigación realizada sobre “El Origen Astrofísico o Cosmológico de los Elementos Químicos”, tanto en su producto teórico escrito, como en su recurso multimedia o Tabla Periódica Digital, posibilita y da un aporte pedagógico para la enseñanza del conocimiento científico, la formación y el desarrollo de competencias científicas y básicas para la vida de los estudiantes.

Para lograr dicho objetivo educativo, se debe tener en cuenta sobre que enfoque pedagógico se orienta esta propuesta, mediante la cual se planean y elaboran los recursos y actividades didácticas para su enseñanza, procurando, como lo propone Gastón Bachelard, desde sus planteamientos epistemológicos, la enseñanza de las ciencias desde un lenguaje científico apropiado, referenciado en un contexto social y cultural. Al igual que, estar bajo los principios y lineamientos legales, ante los cuales se rige y estructura el sistema educativo de Colombia.

Esta propuesta de enseñanza sobre el origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos, se fundamenta en el modelo o enfoque pedagógico del Constructivismo y sustentada en la teoría psicopedagógica de David Ausubel y de Joseph Novak sobre el Aprendizaje Significativo.

El Constructivismo, nos permite un proceso de enseñanza-aprendizaje más completo e integral, permitiendo que los estudiantes comprendan y profundicen cada vez más los conceptos adquiridos, desde sus conocimientos cotidianos, hasta lograr abordar y solucionar situaciones

más complejas, a través de procesos de investigación, teniendo en cuenta sus ideas e intereses, lo que permite lograr que éstos construyan sus propios conocimientos tanto individual como colectivamente, al igual que puedan reestructurarlo o reelaborarlo y adaptarlo a nuevos conocimientos, situaciones, necesidades y campos del conocimiento. La acción del maestro es la de acompañar, coordinar y guiar los procesos de aprendizaje del estudiante, convirtiéndose igualmente en un investigador y promotor del conocimiento; realizando, además, una evaluación integral desde el antes, durante y el final del proceso. Así mismo, con el Constructivismo como lo expresa Vygotsky desde su teoría del desarrollo social, el salón de clase se debe convertir en una comunidad de aprendizaje, dándose una enseñanza recíproca entre estudiantes y profesores, lo que enriquece el aprendizaje y formación de todos en competencias desde el ser, el saber y el hacer. Finalmente, el Constructivismo permite al estudiante un desarrollo personal, que aprenda a aprender, y sea capaz de relacionarse en sociedad, con buen desempeño laboral y en armonía con el ambiente.

Ahora, desde el Aprendizaje Significativo, según lo planteado por David Ausubel en su teoría, para lograr un mejor y adecuado proceso de enseñanza-aprendizaje, es muy importante tener en cuenta y valorar los saberes previos que poseen los estudiantes al abordar una temática determinada y a partir de éstos hacer el proceso de incorporar nuevos conceptos; además, a través de este proceso se debe contar con estrategias, recursos y materiales didácticos coherentes, dinámicos, llamativos, pertinentes e integradores, que faciliten y motiven a los estudiantes al aprender y al querer hacer; obteniéndose un logro muy significativo, cuando el mismo estudiante o individuo, es capaz de reordenar y reestructurar su conocimiento, para seguir aprendiendo y resolviendo situaciones problemas.

En cuanto a la parte legal, se ha tenido en cuenta estar bajo la normativa de la Ley General de la Educación (Ley 115 de 1994) y las directrices del Ministerio de Educación Nacional de Colombia (MEN) vigentes a la fecha; al igual que, el correspondiente Proyecto Educativo Institucional (PEI), de la Institución Educativa Rural Benigno Mena González del municipio de San Jerónimo, en donde dicho proyecto tiene su inicio y campo de acción.

Ante la Ley General de la Educación, se ha tenido en consideración, en cuanto a la educación formal de la básica secundaria y media, el Artículo 22 sobre los objetivos específicos de la educación básica secundaria, en su numeral d, donde se busca promover: "El avance en el conocimiento científico de los fenómenos físicos, químicos y biológicos, mediante la comprensión de las leyes, el planteamiento de problemas y la observación experimental" y el numeral i, que especifica: "El estudio científico del universo, de la tierra, de su estructura física". Al igual que, en el Artículo 30 sobre los objetivos específicos de la educación media académica, en su numeral b, que también promueve: "La profundización en conocimientos avanzados de las ciencias naturales". Con lo cual, se busca formar y desarrollar un pensamiento científico y reflexivo, para que los educandos puedan entender su entorno y dar explicación a diferentes procesos y fenómenos naturales tanto físicos, químicos, biológicos, como ambientales, presentes en sus vidas cotidianas.

En cuanto al Ministerio de Educación Nacional, que actúa de acuerdo con el Artículo 78 sobre la regulación del currículo, en especial sobre los contenidos en las diferentes áreas del conocimiento, como es el caso de las Ciencias Naturales, establecida en el Artículo 23 como área obligatoria y fundamental, y además como componente pedagógico del Proyecto Educativo Institucional (PEI) según los artículos 73 y 79.

Ante la normativa mencionada, se hace una revisión del Plan de Estudios del Área de Ciencias Naturales y Ambiental de la institución educativa, y se procede a identificar y ubicar por temática el proyecto de investigación dentro de los contenidos establecidos por grados en la básica secundaria y media. Y posteriormente, proceder a incorporar y aplicar dicho conocimiento y material elaborado al plan de estudios.

Se ha encontrado pertinente aplicar el proyecto de investigación en los grados 6°, 7° y 10°, abordando la profundización de sus contenidos de acuerdo con el nivel de aprendizaje de los estudiantes; con mayor énfasis en la asignatura de Química del Grado 10°, específicamente en la unidad sobre “La Materia, su origen y estructura”.

De igual forma, es pertinente mencionar que, desde cualquier otro grado de aprendizaje se pueden abordar los contenidos de este trabajo de investigación, desde grados de la básica primaria, con un debido acompañamiento del docente; en la básica secundaria y media, al tratar temas relacionados con la materia, los elementos químicos, el ambiente, el origen del universo, entre otros; y a nivel universitario en el estudio de la astronomía y la astrofísica, podrán encontrar un documento y material que compila información sobre el origen de los elementos químicos en el universo, la cual puede ser mejorada y dar inicio a nuevos proyectos de investigación.

Retomando la proyección que tiene este trabajo a nivel de la Básica Secundaria y Media, se presenta a continuación por grado, las Unidades Temáticas y subtemas, dentro de los cuales se desarrollará básicamente el proyecto; las Secuencias Didácticas, correspondientes a cada Unidad Temática y el Recurso o Material Didáctico que se han diseñado para mejorar el aprendizaje.

4.2.1. Unidades temáticas

Los contenidos temáticos dados por grados dentro de los cuales se desarrollará básicamente el proyecto de investigación son:

- GRADO 6°

El Universo, su origen y estructura.

- Teorías sobre el origen del Universo, del Sistema Solar y la Tierra.
- El origen de la materia, los átomos y los elementos químicos.
- La estructura del universo: Las Galaxias, Nebulosas, Estrellas, Planetas, Asteroides, Cometas, y otros.

- GRADO 7°

La Materia y su clasificación: Sustancias Pura e Impuras

- Sustancias Puras: Los Elementos y los Compuestos Químicos.
- Los Elementos Químicos, su origen, estructura y clasificación.
- Los Elementos Químicos básicos para la vida en la Tierra.

- GRADO 10°

La Materia, su origen y estructura.

- Teoría del Big Bang, sobre el origen del Universo.
- El Átomo, su teoría y estructura.
- Los Elementos Químicos, su origen y propiedades.
- La Tabla Periódica y la clasificación de los elementos químicos.

4.2.2. Secuencias didácticas

La planeación de las unidades temáticas anteriormente presentadas, se han elaborado bajo el formato de Secuencias Didácticas correspondientes al Programa Todos a Aprender (PTA) del Ministerio de Educación Nacional de Colombia, el cual ha sido adoptado por la Institución Educativa Rural Benigno Mena González, para la planeación de todas las actividades académicas. Estas, según el programa PTA se establecen como:

Secuencias didácticas que contengan una descripción de los objetivos para cada sesión de trabajo, de las posibilidades didácticas para desarrollarla articulando diferentes fuentes y recursos: libros, herramientas virtuales, personas y objetos del entorno, etc., y criterios e instrumentos para la evaluación formativa de los estudiantes, resultan de gran ayuda, pues promueven el aprendizaje no sólo de los niños sino también de los maestros. Los materiales para el docente que acompañan el material de los estudiantes deben presentar los problemas que típicamente tienen los estudiantes, las fuentes de estas dificultades y pistas para lograr resolverlas. (Ministerio de Educación Nacional, 2012, p. 10).

Teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente, se presentan a continuación las correspondientes secuencias didácticas planeadas para la enseñanza del origen de los elementos químicos y la materia en el universo, para los grados 6°, 7° y 10°.

SECUENCIA DIDÁCTICA - PROGRAMACIÓN CURRICULAR – PTA ANTIOQUIA

ESTABLECIMIENTO EDUCATIVO: INSTITUCIÓN EDUCATIVA RURAL BENIGNO MENA GONZALEZ	
MAESTRO: Jorge Ignacio Lara Mejía	GRADO: Sexto (6°)
ÁREA O ÁREAS: Ciencias Naturales	PERIODO: Tercero
EJE PROBLÉMICO / PREGUNTA / SITUACIÓN PROBLEMA / OBJETO MOTIVO / TÓPICO GENERADOR: El Universo, su origen y estructura. ¿Cómo se originó el Universo, todo lo que existe y nos rodea?	

Objetivo general / Logro	Preguntas guía	Visión general / Contenidos	Filosofía institucional
Despertar en los estudiantes el espíritu científico a través de diferentes procesos teórico-prácticos, que le permitan explicar, tomar decisiones y argumentar problemas de su entorno y ponerlos en práctica en diferentes situaciones de sus vidas cotidianas.	<p>¿De qué estamos hechos? ¿De dónde proviene todo lo que nos rodea? ¿Cómo se originó la materia y la energía? ¿Qué es el Universo? ¿Cómo se originó el universo? ¿Qué estructuras u objetos celestes conforman el universo? ¿Cómo se originaron los elementos químicos? ¿Dónde se originaron o se originan los elementos químicos?</p>	<p>El Universo, su origen y estructura.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Teorías sobre el origen del Universo, del Sistema Solar y la Tierra. - El origen de la materia, de las partículas, los átomos y los elementos químicos. - La estructura del universo: Las Galaxias, Nebulosas, Estrellas, Planetas, Asteroides, Cometas y otros cuerpos celestes. 	<p>Con este tema se busca formar al estudiante en el Saber sobre la Astronomía.</p> <p>Comprender los principios, sus aplicaciones e importancia en la vida cotidiana.</p> <p>El estudiante aprende a valorar la vida y su entorno, para cuidarlo y protegerlo.</p>

1. EXPLORACIÓN DE PRESABERES Y DIAGNÓSTICO	Materiales educativos	Indicadores / criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase tipo conversatorio sobre qué es lo que saben los estudiantes sobre:</p> <p>El Universo, su origen y estructura.</p> <p>- Teorías sobre el</p>	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p>	<p>En esta etapa se espera identificar, qué tanto saben los estudiantes sobre el tema.</p> <p>Se valorará la participación, la atención, el interés y las explicaciones o</p>	<p>En dicho conversatorio, se valorará desde la participación, la oralidad, la elaboración de preguntas, entre otras.</p>

<p>origen del Universo, del Sistema Solar y la Tierra.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El origen de la materia, de las partículas, los átomos y los elementos químicos. - La estructura del universo: Las Galaxias, Nebulosas, Estrellas, Planetas, Asteroides, Cometas y otros cuerpos celestes. <p>Se les indaga con las Preguntas Guías:</p> <p>¿De qué estamos hechos? ¿De dónde proviene todo lo que nos rodea? ¿Cómo se originó la materia y la energía? ¿Qué es el Universo? ¿Cómo se originó el universo? ¿Qué estructuras u objetos celestes conforman el universo? ¿Cómo se originaron los elementos químicos? ¿Dónde se originaron o se originan los elementos químicos?</p>	<p>Imágenes y video sobre el Universo.</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Tabla Periódica tradicional de los Elementos Químicos.</p>	<p>argumentaciones sobre el tema.</p>	
---	--	---------------------------------------	--

2. INDAGACIÓN	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase tipo conversatorio y magistral, donde se procede a definir, comprender e identificar los temas:</p> <p>El Universo, su origen y estructura.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Teorías sobre el origen del Universo, del Sistema Solar y la Tierra. - El origen de la materia, de las partículas, los átomos y los elementos químicos. 	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p> <p>Presentación en PowerPoint: Fundamentos de Astronomía.</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p>	<p>En esta etapa se valorará en el estudiante la participación, la atención y el interés en el Encuentro Pedagógico.</p> <p>Se espera que el estudiante logre:</p> <p>Mostrar interés y responsabilidad en el desarrollo de las actividades teóricas y prácticas realizadas sobre el tema.</p>	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico. - Realización de apuntes en el Cuaderno de Ciencias Naturales.

<ul style="list-style-type: none"> - La estructura del universo: Las Galaxias, Nebulosas, Estrellas, Planetas, Asteroides, Cometas y otros cuerpos celestes. 	<p>Video sobre el origen del Universo, hasta el Sistema Solar.</p> <p>Tabla Periódica Digital Interactiva Sobre el Origen de los Elementos Químicos.</p>		
---	--	--	--

3. ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INFORMACIÓN	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase práctica, para comprender mejor los conceptos sobre el origen del universo y la materia, al igual que, la identificación y conocimiento sobre los diferentes cuerpos celestes como las nebulosas, las galaxias, las estrellas, los planetas, satélites y cometas entre otros; realizando mapas conceptuales, manejo de Software de astronomía, Tabla Periódica Digital interactiva, material didáctico sobre el origen de los elementos químicos y la realización de observaciones astronómicas al Sol, las estrellas y la Luna.</p>	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p> <p>Presentación en PowerPoint: Fundamentos de Astronomía.</p> <p>Software Stellarium, para la observación virtual del cielo.</p> <p>Tabla Periódica Digital Interactiva Sobre el Origen de los Elementos Químicos.</p> <p>Material didáctico para la simulación de los procesos de nucleosíntesis, con esferas magnéticas que representan las partículas atómicas correspondientes a los protones y los neutrones.</p>	<p>Se espera que el estudiante logre:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comprende el origen de la materia, desde las primeras partículas, los átomos y los elementos químicos, según como lo plantea la teoría del Big Bang. - Identifica y relaciona entre sí, las diferentes estructuras u objetos celestes que conforman el Universo, como las Galaxias, las Nebulosas, las Estrellas, los Planetas, los Asteroides y los Cometas, entre otros. 	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico. - Realización de la actividad práctica sobre los procesos de nucleosíntesis de los elementos químicos. - Comprensión y explicación de los procesos de nucleosíntesis representados en la actividad para los diferentes elementos químicos.

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA / TRANSFERENCIA / SOCIALIZACIÓN DE RESULTADOS	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase práctica, en la cual se busca conocer los alcances obtenidos por los estudiantes en cuanto a los contenidos estudiados en la unidad, realizando una</p>	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p>	<p>Se espera que el estudiante logre:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comprende la Teoría Científica del Big Bang, que da explicación al origen 	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico.

<p>actividad mediante el juego didáctico “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis” y la elaboración de un Taller general y evaluación tipo Prueba Saber Institucional.</p>	<p>Se requerirá de:</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Tabla Periódica Digital Interactiva Sobre el Origen de los Elementos Químicos.</p> <p>Juego didáctico: “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”</p> <p>Taller final sobre los conceptos estudiados en la unidad.</p> <p>Cuaderno de notas del curso.</p>	<p>del Universo, del Sistema Solar y de la Tierra.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comprende el origen de la materia, desde las primeras partículas, los átomos y los elementos químicos, según como lo plantea la teoría del Big Bang. - Identifica y relaciona entre sí, las diferentes estructuras u objetos celestes que conforman el Universo, como las Galaxias, las Nebulosas, las Estrellas, los Planetas, los Asteroides y los Cometas, entre otros. - Muestra interés y responsabilidad en el desarrollo de diferentes actividades teóricas y prácticas como consultas, exposiciones y experimentos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Participación y desempeño en el Juego Didáctico “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”. - Solución al taller final y evaluativo sobre los procesos de nucleosíntesis. - Revisión de apuntes en el Cuaderno de Ciencias Naturales. - Evaluación Prueba Saber Institucional.
---	---	--	---

SECUENCIA DIDÁCTICA - PROGRAMACIÓN CURRICULAR – PTA ANTIOQUIA

ESTABLECIMIENTO EDUCATIVO: INSTITUCIÓN EDUCATIVA RURAL BENIGNO MENA GONZALEZ	
MAESTRO: Jorge Ignacio Lara Mejía	GRADO: Séptimo (7°)
ÁREA O ÁREAS: Ciencias Naturales	PERIODO: Primero
EJE PROBLÉMICO / PREGUNTA / SITUACIÓN PROBLEMA / OBJETO MOTIVO / TÓPICO GENERADOR: La Materia: Los elementos químicos, su origen y estructura. ¿Cómo se originó la materia y los elementos químicos en el universo?	

Objetivo general / Logro	Preguntas guía	Visión general / Contenidos	Filosofía institucional
Despertar en los estudiantes el espíritu científico a través de diferentes procesos teórico-prácticos, que le permitan explicar, tomar decisiones y argumentar problemas de su entorno y ponerlos en práctica en diferentes situaciones de sus vidas cotidianas.	¿Qué es la Materia? ¿De dónde viene la materia? ¿Qué es un elemento químico? ¿Cuál es la estructura atómica de un elemento químico? ¿Cómo se originaron los elementos químicos? ¿Dónde se originaron o se originan los elementos químicos? ¿Cómo son clasificados y organizados los elementos químicos?	La Materia y su clasificación: Sustancias Pura e Impuras - Sustancias Puras: Los Elementos y los Compuestos Químicos. - Los Elementos Químicos, su origen y estructura. - Clasificación y organización de los elementos químicos. - Los Elementos Químicos básicos para la vida en la Tierra.	Con este tema se busca formar al estudiante en el Saber sobre la Química y la Astrofísica. Comprender los principios y sus aplicaciones en la vida cotidiana. El estudiante aprende a valorar la vida y su entorno, para cuidarlo y protegerlo.

1. EXPLORACIÓN DE PRESABERES Y DIAGNÓSTICO	Materiales educativos	Indicadores / criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
Se realiza una clase tipo conversatorio sobre qué es lo que saben los estudiantes sobre: La Materia y su clasificación: Sustancias Pura e Impuras	Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial. Se requerirá de:	En esta etapa se espera identificar, qué tanto saben los estudiantes sobre el tema. Se valorará la participación, la atención, el interés y las explicaciones o	En dicho conversatorio, se valorará desde la participación, la oralidad, la elaboración de preguntas, entre otras.

<ul style="list-style-type: none"> - Sustancias Puras: Los Elementos y los Compuestos Químicos. - Los Elementos Químicos, su origen y estructura. - Clasificación y organización de los elementos químicos. - Los Elementos Químicos básicos para la vida en la Tierra. <p>Se les indaga con las Preguntas Guías:</p> <p>¿Qué es un elemento químico? ¿Cuál es la estructura atómica de un elemento químico? ¿Cómo se originaron los elementos químicos? ¿Dónde se originaron o se originan los elementos químicos? ¿Cómo son clasificados y organizados los elementos químicos?</p>	<p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Tabla Periódica Digital interactiva sobre el origen de los elementos químicos.</p> <p>Tabla Periódica tradicional de los Elementos Químicos.</p>	<p>argumentaciones sobre el tema.</p>	
--	---	---------------------------------------	--

2. INDAGACIÓN	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase tipo conversatorio y magistral, donde se procede a definir, comprender e identificar los temas:</p> <p>La Materia y su clasificación: Sustancias Pura e Impuras</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sustancias Puras: Los Elementos y los Compuestos Químicos. - Los Elementos Químicos, su origen y estructura. - Clasificación y organización de los elementos químicos. 	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p> <p>Video sobre los elementos químicos.</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Tabla Periódica Digital interactiva sobre el origen de los elementos químicos.</p>	<p>En esta etapa se valorará en el estudiante la participación, la atención y el interés en el Encuentro Pedagógico.</p> <p>Se espera que el estudiante logre:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Mostrar interés y responsabilidad en el desarrollo de las actividades teóricas y prácticas realizadas sobre el tema. 	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico. - Realización de apuntes en el Cuaderno de Ciencias Naturales.

- Los Elementos Químicos básicos para la vida en la Tierra.	Tabla Periódica tradicional de los Elementos Químicos.		
---	--	--	--

3. ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INFORMACIÓN	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
Se realiza una clase práctica, para comprender mejor los conceptos sobre la Materia, los Elementos Químicos, su estructura y origen en el universo, utilizando la Tabla Periódica Digital interactiva sobre el origen de los elementos químicos y material didáctico sobre el tema.	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Tabla Periódica sobre el origen de los elementos químicos.</p> <p>Material didáctico para la simulación de los procesos de nucleosíntesis, con esferas magnéticas que representan las partículas atómicas correspondientes a los protones y los neutrones.</p>	<p>Se espera que el estudiante logre:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comprende el origen de la materia, desde las primeras partículas, los átomos y los elementos químicos, según como lo plantea la teoría del Big Bang. - Comprende el concepto de Elemento químico, como sustancia pura, identificando sus características, propiedades, estructuras atómicas y clasificación en la Tabla Periódica. 	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico. - Realización de la actividad práctica sobre los procesos de nucleosíntesis de los elementos químicos. - Comprensión y explicación de los procesos de nucleosíntesis representados en la actividad para los diferentes elementos químicos.

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA / TRANSFERENCIA / SOCIALIZACIÓN DE RESULTADOS	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
Se realiza una clase práctica, en la cual se busca conocer los alcances obtenidos por los estudiantes en cuanto a los contenidos estudiados en la unidad, sobre el origen de los elementos químicos a partir de la nucleosíntesis, realizando una actividad mediante el juego didáctico “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis” y la elaboración de un Taller	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p>	<p>Se espera que el estudiante logre:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comprende el origen de la materia, desde las primeras partículas, los átomos y los elementos químicos, según como lo plantea la teoría del Big Bang. - Comprende el concepto de Elemento 	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico. - Solución al taller final y evaluativo sobre los procesos de nucleosíntesis. - Revisión de apuntes

<p>general y evaluación tipo Prueba Saber Institucional.</p>	<p>Tabla Periódica sobre el origen de los elementos químicos.</p> <p>Material didáctico para la simulación de los procesos de nucleosíntesis, con esferas magnéticas que representan las partículas atómicas correspondientes a los protones y los neutrones.</p> <p>Juego didáctico: “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”</p> <p>Taller final y evaluativo sobre los procesos de nucleosíntesis.</p> <p>Cuaderno de notas del curso.</p>	<p>químico, como sustancia pura, identificando sus características, propiedades, estructuras atómicas y clasificación en la Tabla Periódica.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Reconoce y comprende la importancia de los Elementos Químicos básicos para el desarrollo de la vida en la Tierra. - Muestra interés y responsabilidad en el desarrollo de diferentes actividades teóricas y prácticas como consultas, exposiciones y experimentos. 	<p>en el Cuaderno de Ciencias Naturales-Química.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Evaluación Prueba Saber Institucional
--	---	--	--

SECUENCIA DIDÁCTICA - PROGRAMACIÓN CURRICULAR – PTA ANTIOQUIA

ESTABLECIMIENTO EDUCATIVO: INSTITUCIÓN EDUCATIVA RURAL BENIGNO MENA GONZALEZ	
MAESTRO: Jorge Ignacio Lara Mejía	GRADO: Décimo (10°)
ÁREA O ÁREAS: Ciencias Naturales, Química	PERIODO: Segundo
EJE PROBLÉMICO / PREGUNTA / SITUACIÓN PROBLEMA / OBJETO MOTIVO / TÓPICO GENERADOR: La Materia en el Universo: Los elementos químicos, su origen y estructura. ¿Cómo se originaron los elementos químicos?	

Objetivo general / Logro	Preguntas guía	Visión general / Contenidos	Filosofía institucional
Despertar en los estudiantes el espíritu científico a través de diferentes procesos teórico-prácticos, que le permitan explicar, tomar decisiones y argumentar problemas de su entorno y ponerlos en práctica en diferentes situaciones de sus vidas cotidianas.	<p>¿De qué estamos hechos? ¿Qué es un elemento químico? ¿Cuál es la estructura atómica de un elemento químico? ¿Cómo se originaron los elementos químicos? ¿Dónde se originaron o se originan los elementos químicos? ¿Aún se originan elementos químicos en el universo?, ¿cómo y en dónde?</p>	<p>La Materia, su origen y estructura.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Teoría del Big Bang, sobre el origen del Universo. - El Átomo, su teoría y estructura. - Los Elementos Químicos, su origen y propiedades. - La Tabla Periódica y la clasificación de los elementos químicos. 	<p>Con este tema se busca formar al estudiante en el Saber sobre la Química y la Astrofísica.</p> <p>Comprender los principios y sus aplicaciones en la vida cotidiana.</p> <p>El estudiante aprende a valorar la vida y su entorno, para cuidarlo y protegerlo.</p>

1. EXPLORACIÓN DE PRESABERES Y DIAGNÓSTICO	Materiales educativos	Indicadores / criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase tipo conversatorio sobre qué es lo que saben los estudiantes sobre:</p> <p>La Materia, su origen y estructura.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Teoría del Big Bang, sobre el origen del 	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p> <p>Imágenes del universo,</p>	<p>En esta etapa se espera identificar, qué tanto saben los estudiantes sobre el tema.</p> <p>Se valorará la participación, la atención, el interés y las explicaciones o argumentaciones sobre el</p>	<p>En dicho conversatorio, se valorará desde la participación, la oralidad, la elaboración de preguntas, entre otras.</p>

<p>Universo.</p> <ul style="list-style-type: none"> - El Átomo, su teoría y estructura. - Los Elementos Químicos, su origen y propiedades. <p>Definiciones de elemento químico Estructura atómica de los elementos químicos. Los procesos de Nucleosíntesis: Nucleosíntesis primordial Nucleosíntesis estelar Nucleosíntesis en explosiva Nucleosíntesis interestelar</p> <ul style="list-style-type: none"> - La Tabla Periódica y la clasificación de los elementos químicos. <p>Se les indaga con las Preguntas Guías:</p> <p>¿De qué estamos hechos? ¿Qué es un elemento químico? ¿Cuál es la estructura atómica de un elemento químico? ¿Cómo se originaron los elementos químicos? ¿Dónde se originaron o se originan los elementos químicos? ¿Aún se originan elementos químicos en el universo?, ¿cómo y en dónde?</p>	<p>elementos químicos y objetos cotidianos.</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Tabla Periódica tradicional de los Elementos Químicos.</p>	tema.	
---	---	-------	--

2. INDAGACIÓN	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase tipo conversatorio y magistral, donde se procede a definir, comprender e identificar los temas:</p> <p>Los Elementos Químicos</p>	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p>	<p>En esta etapa se valorará en el estudiante la participación, la atención y el interés en el Encuentro Pedagógico.</p> <p>Se espera que el estudiante logre:</p>	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico.

<ul style="list-style-type: none"> - Definición de elemento químico - Estructura atómica de los elementos químicos. - Origen de los Elementos Químicos: Los procesos de Nucleosíntesis: Nucleosíntesis primordial Nucleosíntesis estelar Nucleosíntesis en explosiva Nucleosíntesis Interestelar 	<p>Presentación en PowerPoint: Fundamentos de Astronomía.</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Video sobre el origen del Universo.</p> <p>Tabla Periódica Digital Interactiva Sobre el Origen de los Elementos Químicos.</p>	<p>Mostrar interés y responsabilidad en el desarrollo de las actividades teóricas y prácticas realizadas sobre el tema.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Realización de apuntes en el Cuaderno de Ciencias Naturales.
---	--	---	--

3. ANÁLISIS Y SÍNTESIS DE INFORMACIÓN	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase práctica, para comprender mejor los conceptos sobre la Materia, los Elementos Químicos, su estructura y origen en el universo, a partir de los procesos de nucleosíntesis primordial, estelar, explosiva e interestelar, utilizando la Tabla Periódica Digital interactiva sobre el origen de los elementos químicos y material didáctico sobre el tema.</p> <p>Se realiza una actividad práctica, para comprender los procesos de nucleosíntesis primordial, estelar y en explosiones de supernovas.</p>	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Tabla Periódica sobre el origen de los elementos químicos.</p> <p>Material didáctico para la simulación de los procesos de nucleosíntesis, con esferas magnéticas que representan las partículas atómicas correspondientes a los protones y los neutrones.</p>	<p>Se espera que el estudiante logre:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Comprender los procesos, los momentos, los lugares y condiciones energéticas, para la formación de los elementos químicos. - Comprender los procesos de nucleosíntesis mediante los cuales se originan los elementos químicos. - Realizar una actividad practica de modelización, que permita comprender la formación de los núcleos atómicos. 	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico. - Realización de la actividad práctica sobre los procesos de nucleosíntesis de los elementos químicos. - Comprensión y explicación de los procesos de nucleosíntesis representados en la actividad para los diferentes elementos químicos.

4. RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA / TRANSFERENCIA / SOCIALIZACIÓN DE RESULTADOS	Materiales educativos	Indicadores/ criterios de evaluación	Instrumentos de evaluación
<p>Se realiza una clase tipo conversatorio y magistral, donde se procede hace un resumen de lo visto en el tema y se hacen preguntas problema sobre el origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos.</p>	<p>Se realizará el Encuentro Pedagógico en la Casa del Conocimiento: Observatorio Planeta Tierra o en el Laboratorio Casa Industrial.</p> <p>Se requerirá de:</p> <p>Texto del trabajo de investigación sobre: “El origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos”.</p> <p>Tabla Periódica sobre el origen de los elementos químicos.</p> <p>Material didáctico para la simulación de los procesos de nucleosíntesis, con esferas magnéticas que representan las partículas atómicas correspondientes a los protones y los neutrones.</p> <p>Juego didáctico: “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”</p> <p>Taller final y evaluativo sobre los procesos de nucleosíntesis.</p> <p>Cuaderno de notas del curso.</p>	<p>Se espera que el estudiante logre:</p> <p>Comprende el origen de la materia, desde las primeras partículas, los átomos y los elementos químicos, según como lo plantea la teoría del Big Bang.</p> <p>Comprende el concepto teórico actual del átomo como la estructura básica de la materia, al igual que el desarrollo de su teoría a través de la historia.</p> <p>Comprende el concepto de Elemento químico, como sustancia pura, identificando sus características, propiedades, estructuras atómicas y clasificación en la Tabla Periódica.</p> <p>Reconoce y comprende la importancia de los Elementos Químicos básicos para el desarrollo de la vida en la Tierra.</p> <p>Muestra interés y responsabilidad en el desarrollo de diferentes actividades teóricas y prácticas como consultas, exposiciones y experimentos.</p>	<p>Se valorará de la siguiente forma:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Atención y participación en el Encuentro Pedagógico. - Solución al taller final y evaluativo sobre los procesos de nucleosíntesis. - Revisión de apuntes en el Cuaderno de Ciencias Naturales-Química. - Evaluación Prueba Saber Institucional

4.2.3. Recurso o material didáctico

Abordar la temática sobre el origen cosmológico y astrofísico de los elementos químicos, a nivel educativo de la Básica Secundaria y Media en la Institución Educativa Rural Benigno Mena González, ha requerido realizar una serie de ajustes conceptuales y procedimentales, ya que estas temáticas a nivel de estudios superiores y de investigación en astrofísica y astronomía, desarrollan conceptos teóricos y procedimientos matemáticos más complejos, lo que puede generar en los estudiantes desmotivación, apatía y dificultad en el proceso de aprendizaje. Es por esto que, se ha pensado en una metodología apoyada en Recursos o Materiales Didácticos apropiados, que permitan transmitir los conceptos científicos sin perder su validez y rigurosidad conceptual, mientras que logren captar el interés y la fascinación por el tema en los estudiantes.

Los Recursos y Materiales Didácticos, son en sí, fundamentales para lograr dicho fin, facilitando la construcción del conocimiento, tal como lo explica Ana G. Fernández:

Un recurso didáctico es cualquier procedimiento, estrategia, actividad, objeto, técnica, elemento que tengamos a la mano y que pueda ayudar a los involucrados en el proceso educativo; en primer lugar, a fijar la atención, a mantener el interés, a comprender, a ir formando imágenes mentales, a relacionar los conocimientos nuevos con los que ya conocemos, a guardarlos en la memoria, a poder recuperarlos cuando los necesitemos, a aplicarlos en la solución de un problema. (Fernández, 2010, p. 13).

Podemos contar con una gran variedad de Recursos Didácticos, que a menudo son materiales cotidianos como libros, videos, canciones, mapas, simuladores, pinturas, Internet, software, modelos, maquetas, salidas pedagógicas, juegos, dramatizados y exposiciones entre muchos otros. Ante esto, es muy importante que los docentes seamos capaces de diseñar nuevos materiales didácticos a partir de los intereses e imaginarios de los mismos estudiantes; ser creadores e innovadores en este campo, lo que enriquece nuestro quehacer docente.

Ahora bien, para lograr la enseñanza del origen de los elementos químicos en el universo y su importancia para la vida, se cuenta con materiales teóricos y audiovisuales de uso público como documento, imágenes, audiovisuales en YouTube, Blog científicos y otros Sitios Web.

Adicional a estos materiales, un objetivo de este trabajo de investigación es la creación de nuevos Recursos o Materiales Didácticos para la enseñanza sobre el origen de los elementos químicos, al igual que motivar y generar en los docentes y personas interesadas en el tema pedagógico, la creación de nuevos materiales didácticos de acuerdo a las diferentes áreas del saber.

En este trabajo de investigación además de obtenerse este contenido teórico sobre el origen astrofísico o cosmológico de los elementos químicos, se ha logrado materializar dos productos adicionales importantes en la proyección académica; siendo en primer lugar la elaboración de una Tabla Periódica Digital Interactiva, que compila información sobre los 92 elementos estables en la naturaleza, en cuanto al origen, abundancia, distribución e importancia para la vida, la cual se ha presentado previamente en la Sección 4.1., y que estará activa en el sitio web en enlace o link: <http://urania.udea.edu.co/users/jlara/>

En segundo lugar, la elaboración de un Juego Didáctico sobre el proceso de la Nucleosíntesis en el Universo, en el cual se busca trabajar y enfatizar en los conceptos relacionados con el origen de los elementos químicos a través de la nucleosíntesis, además de otros conceptos relacionados y fundamentales sobre el Big Bang, la estructura atómica y las estrellas. Se ha elegido desarrollar un juego didáctico, puesto que según Angela Goulet G.:

Un estudiante al jugar manifiesta su curiosidad, su capacidad de asombro, del interés por las cosas que le rodea y le preocupan manifiesta su incipiente afán de investigador y con él, la capacidad de observador, la experimentación, el intercambio e incluso la manera especial de divulgar sus resultados científicos entre sus compañeros y familiares. (Goulet, 2009, p. 22).

El diseño de este juego, le exige al estudiante realizar actividades académicas y procedimentales que le permiten profundizar en el conocimiento científico, resolviendo preguntas, retos de consulta, de investigación y socialización, que posibilitan un aprendizaje productivo, lúdico, colaborativo, cooperativo, integral, transformador y de competencias de los individuos en su entorno. A continuación, se hace una presentación y descripción del Juego Didáctico sobre la Nucleosíntesis y el origen de los elementos químicos en el Universo.

➤ **Juego didáctico: “Un viaje a través de la nucleosíntesis”**

Introducción

El juego “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”, se ha diseñado con el fin de llevar al aula de clase o encuentros pedagógicos, la enseñanza de una forma lúdica, el conocimiento científico sobre origen cosmológico y astrofísico de los elementos químicos en el universo, en especial, los 92 elementos más estables en la naturaleza, desde el Hidrógeno (H) hasta el Uranio (U). Permitiendo que los estudiantes comprendan mejor la teoría sobre el origen del universo o teoría del Big Bang, la estructura nuclear de los átomos de los diferentes elementos químicos y sus isótopos, los diferentes procesos de nucleosíntesis que dan origen a los elementos químicos; al conocimiento sobre las estrellas y sus diferentes etapas de vida que permiten la síntesis de los elementos químicos, y a comprender la importancia de éstos para la vida en la Tierra.

Objetivos:

• *Objetivo General:*

Comprender mediante una actividad lúdica, el origen de los elementos químicos en el universo mediante el proceso de nucleosíntesis.

• *Objetivos Específicos:*

- Conocer la Tabla Periódica de los Elementos Químicos
- Conocer e identificar los elementos químicos, según sus nombres y símbolos.

- Comprender la estructura nuclear de los átomos para los diferentes elementos químicos, según su número de protones y neutrones.
- Reconocer los diferentes tipos de nucleosíntesis que se presentan en el universo.
- Conocer e identificar el tipo de nucleosíntesis que da origen a cada elemento químico en el universo.
- Conocer la importancia de cada elemento químico para la vida y dónde se puede encontrar.

Descripción:

El juego “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”, presenta un diseño del tipo “juego de mesa”, contando con el siguiente material: un tablero de juego, fichas de jugadores, un dado, tarjetas de los elementos químicos, una colección de partículas nucleares (protones y neutrones) y las correspondientes instrucciones del juego, material que será descrito más adelante.

El juego cuenta con un soporte teórico adicional que corresponde a la “Tabla Periódica Interactiva sobre el Origen de los Elementos Químicos”, la cual se pueden consultar en el enlace o link: <http://urania.udea.edu.co/users/jlara/>, para dar solución a diferentes preguntas y retos en el juego.

Materiales:

- *Tablero de Juego de Elementos Químicos*

El Tablero es una superficie plana que tiene impreso los 92 elementos químicos desde el Hidrógeno (H) hasta el Uranio (U); se encuentran organizados en casillas o

recuadros, en orden ascendente según sus números atómicos, identificados por el código de color según el tipo de nucleosíntesis donde se origina cada elemento químico en el universo, tal como está representado en la Tabla Periódica Digital Interactiva. Además, cada elemento químico presenta la siguiente información: nombre, símbolo químico, número atómico, isótopos estables con sus respectivos números másicos con los cuales se identifican, y una o dos imágenes representativas del elemento en la naturaleza (Véanse Figuras 18, 19, 20, 21 y 22).



Figura 18: Tablero del juego “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”

Fuente: Elaboración propia, con imágenes tomadas de Wikipedia, Webelements y Lenntech.

Dentro de la distribución de los Elementos Químicos, se encuentran una serie de casillas adicionales como: “Inicio”, “Preguntas”, “Retos” y “Final”.

En la casilla *Inicio*, denominada Big Bang / Origen del Universo, se da la partida o comienzo del juego.

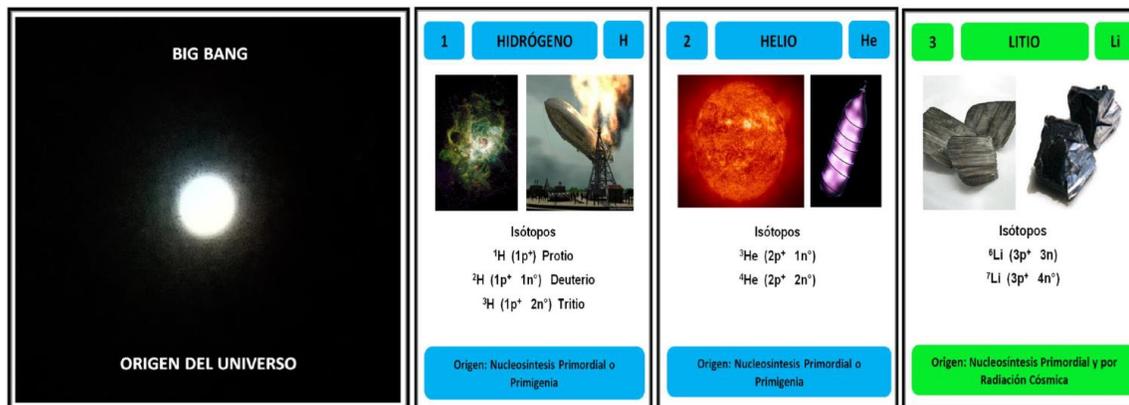


Figura 19: Casilla de Inicio (Big Bang / Origen del Universo) y secuencia de casillas de Elementos Químicos (Hidrógeno, Helio y Litio).

Fuente: Elaboración propia, con imágenes tomadas de Wikipedia, Webelements y Lenntech.

La casilla *Final*, denominada Universo / Lograste el viaje a través de la Nucleosíntesis, da por terminado el juego y determinará el ganador de éste.

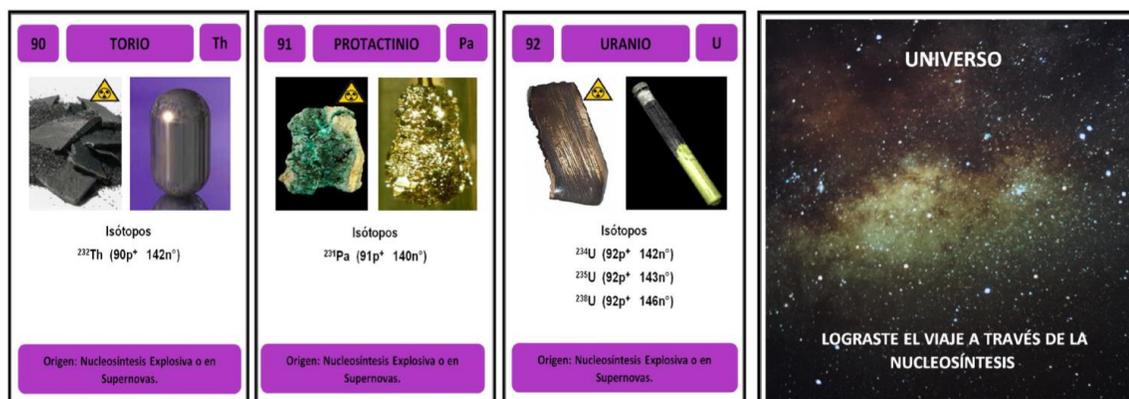


Figura 20: Casilla Final (Universo / Lograste el Viaje a través de la Nucleosíntesis) y secuencia de casillas de Elementos Químicos (Torio, Protactinio y Uranio).

Fuente: Elaboración propia, con imágenes tomadas de Wikipedia, Webelements y Lenntech.

Las casillas *Preguntas*, como sus nombres lo indican, constan de una serie de preguntas, que los jugadores deberán responder para avanzar en el juego.

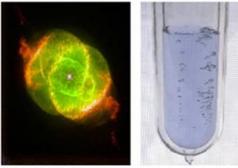
<p>8 OXÍGENO O</p>  <p>Isótopos ^{16}O (8p⁺ 8n⁰) ^{17}O (8p⁺ 9n⁰) ^{18}O (8p⁺ 10n⁰)</p> <p>Origen: Nucleosíntesis Estelar en estrellas de baja masa y gran masa.</p>	<p>PREGUNTAS: SOBRE PARTÍCULAS Y ÁTOMOS</p> <p>Lanza el dado y el número que saques corresponde a la pregunta que debes responder para continuar.</p> <p>PREGUNTAS:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. ¿Qué tipos de partículas subatómicas se conocen? 2. ¿Qué son los Quarks, los Neutrinos y los Fotones? 3. ¿Qué Quark conforman a los Protones y Neutrones? 4. ¿Qué son y qué características tienen los Protones, Neutrones y Electrones? 5. ¿Qué partículas conforman el núcleo del átomo? 6. ¿Qué es el Átomo, cómo es su estructura y cómo se define en general? <p>Nota</p> <p>Si responde correctamente, lanza de nuevo el dado para avanzar en el juego. Si no responde correctamente, permanece en la casilla hasta el próximo turno, donde deberá lanzar el dado y responder otra pregunta.</p>	<p>9 FLÚOR F</p>  <p>Isótopos ^{19}F (9p⁺ 10n⁰)</p> <p>Origen: Nucleosíntesis Estelar en estrellas de baja masa y gran masa.</p>
--	---	--

Figura 21: Casilla de Preguntas (Preguntas: Sobre Partículas y Átomos) y casillas de Elementos Químicos (Oxígeno y Flúor).

Fuente: Elaboración propia, con imágenes tomadas de Wikipedia, Webelements y Lenntech.

Dichas casillas contienen las siguientes preguntas, que se pueden trabajar previamente como taller en el aula de clase durante el curso de Ciencias Naturales.

PREGUNTAS: SOBRE PARTÍCULAS Y ÁTOMOS

1. ¿Qué tipos de partículas subatómicas se conocen?
2. ¿Qué son los Quarks, los Neutrinos y los Fotones?
3. ¿Qué Quark conforman a los Protones y Neutrones?
4. ¿Qué son y qué características tienen los Protones, Neutrones y Electrones?
5. ¿Qué partículas conforman el núcleo del átomo?
6. ¿Qué es el Átomo, cómo es su estructura y cómo se define en general?

PREGUNTAS: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS PRIMORDIAL

1. ¿Qué se entiende por Nucleosíntesis Primordial?
2. ¿Cuáles fueron las primeras partículas que se originaron en el Universo?
3. ¿Cuál fue el primer núcleo atómico que se originó en el Universo y a cuál elemento químico corresponde?
4. ¿Cuáles son los Isótopos del primer elemento químico en el universo y cómo están constituidos sus núcleos?
5. ¿Cuál es el segundo elemento químico que se originó en el universo y a partir de cuáles isótopos?
6. ¿Cuáles son los primeros elementos químicos y más abundantes en el Universo?, y ¿qué otros elementos químicos se formaron en muy baja cantidad?

PREGUNTAS: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR (1)

1. ¿Qué se entiende por Nucleosíntesis Estelar?
2. ¿Qué se entiende por estrellas de baja masa y de gran masa?
3. ¿Cuáles son los elementos básicos a partir de los cuales se comienzan a sintetizar los demás elementos químicos en las estrellas?
4. ¿Qué se entiende por Secuencia Principal, Gigante y Súpergigante Roja, en el ciclo de vida de una Estrella?
5. ¿Qué es y en qué consiste el proceso de Fusión Nuclear?
6. ¿Qué es y en qué consiste el proceso de Fisión Nuclear?

PREGUNTAS: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS ESTELAR (2)

1. ¿Qué es el proceso o Cadena Protón-Protón (P-P)?
2. ¿Qué es el proceso o Ciclo CNO?
3. ¿En qué consiste el Proceso-s y el Proceso-r?
4. ¿Por qué el Hierro (Fe) es un elemento clave en el proceso de nucleosíntesis en las estrellas?
5. ¿Qué elementos químicos se sintetizan en las estrellas de baja masa?
6. ¿Qué elementos químicos se sintetizan en las estrellas de gran masa o masivas?

PREGUNTAS: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS EXPLOSIVA

1. ¿Qué se entiende por Nucleosíntesis Explosiva o en Supernovas?
2. ¿Qué es y en que se caracteriza una Estrella Supernova?
3. ¿Qué tipos de Estrellas Supernovas se conocen?
4. ¿Qué es y en qué consiste el Proceso-r?
5. ¿Qué elementos químicos se sintetizan en la explosión de estrellas como Supernovas?
Argumenta con 3 ejemplos.
6. ¿Qué queda como residuo o producto después de la explosión de una supernova y de acuerdo a su tipo?

PREGUNTAS: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS INTERESTELAR

1. ¿Qué se entiende por Nucleosíntesis Interestelar?
2. ¿Qué es la Radiación Cósmica?

3. ¿Qué elementos químicos se forman por Radiación Cósmica? Argumenta con 3 ejemplos.
4. ¿Qué es la Desintegración Beta y la Desintegración Radiactiva o Emisión Alfa?
5. ¿Qué elementos químicos se forman por desintegración beta? Argumenta con 3 ejemplos.
6. ¿Qué elementos químicos se desintegran radiactivamente y qué elementos forman? Argumenta con 3 ejemplos.

PREGUNTAS: SOBRE LAS ESTRELLAS

1. ¿Qué es una Estrella?
2. ¿Qué es una Estrella Enana Blanca?
3. ¿Qué es una Estrella Gigante y Supergigante Roja?
4. ¿Qué es una Estrella Supernova?
5. ¿Qué es una Estrella de Neutrones?
6. ¿Qué son Protoestrellas y Estrellas Marrón?

PREGUNTAS: SOBRE LOS ELEMENTOS QUÍMICOS

1. ¿Qué es un Elemento Químico e Isótopos?
2. ¿Cuáles son considerados como los Elementos Químicos Ligeros?
3. ¿Cuáles son considerados como los Elementos Químicos Livianos?
4. ¿Cuáles son considerados como los Elementos Químicos Pesados?
5. ¿Cuáles son los Elementos Químicos básicos para la vida? Argumenta dando ejemplos.

6. ¿Cuáles son los Elementos Químicos nocivos para la vida? Argumenta dando ejemplos.

Las casillas *Retos*, como sus nombres lo indican, constan de una serie de retos, que los jugadores deberán resolver para avanzar en el juego.

The image shows three cards from a game. The first card is for Tungsteno (Wolframio), element 74 (W). It features images of tungsten metal and powder, lists four isotopes with their proton and neutron counts, and states its origin as stellar nucleosynthesis in massive stars and supernovas. The second card is a red 'Challenge' card (Reto 2) about nucleosynthesis, instructing players to choose an element with the highest atomic number, consult a periodic table, and socialize about the reaction. The third card is for Renio, element 75 (Re), featuring images of a globe and a scale, lists two isotopes, and states its origin as explosive nucleosynthesis in supernovas.

Figura 22: Casilla de Reto (Reto 2: Sobre Nucleosíntesis) y casillas de Elementos Químicos (Tungsteno/Wolframio y Renio).

Fuente: Elaboración propia, con imágenes tomadas de Wikipedia, Webelements y Lenntech.

Dichas casillas contienen los siguientes retos, que se pueden trabajar previamente como taller práctico en el aula de clase durante el curso de Ciencias Naturales, consultando la Tabla Periódica con el Origen de los Elementos Químicos, en el Sitio Web con el enlace o link:

<http://urania.udea.edu.co/users/jlara/>

RETO 1: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS

Para consultar y socializar:

De los Elementos Químicos que has obtenido, elige dos (2), uno que contenga el menor Número Atómico y el otro, que contenga mayor Número Atómico.

Luego, consulta en la Tabla Periódica Interactiva con el Origen de los Elementos Químicos, sobre el tipo de Nucleosíntesis, estrella y/o proceso por medio del cual se origina cada uno.

Finalmente, socializa lo consultado con una explicación adecuada.

RETO 2: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS

Para consultar y socializar:

De los Elementos Químicos que has obtenido, elige el que contenga mayor Número Atómico.

Luego, consulta en la Tabla Periódica Interactiva con el Origen de los Elementos Químicos, las reacciones de Nucleosíntesis por medio de las cuales se forma.

Finalmente, socializa lo consultado y representa dicha reacción ante los demás participantes, utilizando las esferas magnéticas de Protones y Neutrones.

RETO 3: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS

Para consultar y socializar:

De los Elementos Químicos que has obtenido, elige el que contenga mayor Número Atómico.

Luego, consulta en la Tabla Periódica Interactiva con el Origen de los Elementos Químicos, su importancia para la vida en la Tierra.

Finalmente, socializa lo consultado con una explicación adecuada.

RETO 4: SOBRE NUCLEOSÍNTESIS

Para consultar y socializar:

De los Elementos Químicos que has obtenido, elige el que contenga mayor Número Atómico.

Luego, consulta en la Tabla Periódica Interactiva sobre el Origen de los Elementos Químicos, su distribución y abundancia en el Universo, el Sol, la Tierra y el Cuerpo Humano.

Finalmente, socializa lo consultado con una explicación adecuada.

- *Colección de Partículas Nucleares*

Es una colección de esferas magnéticas que representan las partículas nucleares de Protones y de Neutrones. Los Protones (p^+), se representan con esferas de color blanco y los Neutrones (n^0), con esferas de color negro.



Figura 23: Partículas Nucleares de Protones (p^+) y Neutrones (n^0).

Con estas esferas, cada estudiante podrá representar a modo de un “modelo físico” tridimensional (3D), los núcleos de los elementos químicos trabajados y sus respectivas reacciones de nucleosíntesis.

- *Fichas de Jugadores*

Es una serie de fichas de diferentes colores, que deben utilizar los jugadores para identificarse y participar en el juego (véase Figura 24).

- *Dado*

Es el elemento que permite dar inicio y avanzar de forma aleatoria en el juego a los participantes y en la selección de las preguntas y retos.



Figura 24: Fichas de Jugadores y Dado.

Fuente: Elaboración propia, con imágenes tomadas de Wikipedia, Webelements y Lenntech.

- *Tarjetas de Elementos Químicos:*

Para los 92 elementos químicos, se cuenta con tarjetas para cada Elemento Químico, iguales a las casillas que se presentan en el Tablero del juego, en una cantidad de 6 a 8 copias, por cada elemento. Estas por lo tanto tienen la siguiente información: nombre del elemento, símbolo químico, número atómico, isótopos estables con sus respectivos números másicos con los cuales se identifican, una o dos imágenes representativas del elemento en la naturaleza.

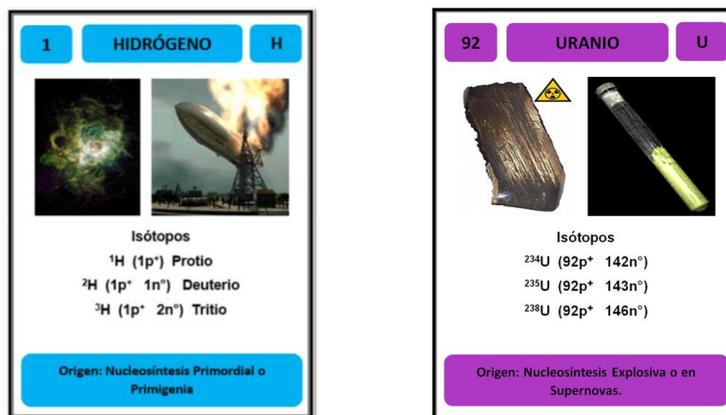


Figura 25: Tarjetas de Elementos Químicos.

Fuente: Elaboración propia, con imágenes tomadas de Wikipedia, Webelements y Lenntech.

Dicha tarjeta se le entregan a cada jugador a medida que estos alcancen cada elemento químico, con el fin de coleccionar los elementos por los que va avanzando. Esto tiene la intencionalidad de hacer al final del juego un balance general y conocer toda su riqueza de los elementos químicos adquiridos.

También, estas tarjetas permiten realizar otras estrategias didácticas de consulta, a parte del juego, las cuales se le pueden entregar a los estudiantes para que consulten en la Tabla Periódica Interactiva sobre el Origen de los Elementos Químicos, toda la información disponible sobre su origen, abundancia, reacciones de nucleosíntesis e importancia para la vida.

Instrucciones del Juego:

1. Para realizar el juego “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”, se requiere de un coordinador o moderador (docente o estudiante capacitado) y seis participantes o jugadores (estudiantes); también se puede trabajar por parejas o equipos.
2. El coordinador o moderador, antes de iniciar el juego hará lectura y explicación de las instrucciones de éste, resolviendo preguntas y dudas al respecto; quedando finalmente en común acuerdo con los participantes.
3. Luego, el coordinador o moderador organizará la secuencia u orden en el cual los participantes iniciarán el juego. Este proceso se realiza haciendo el lanzamiento del dado y de acuerdo con el número que saquen, inician el juego, que por lo general se

hace en orden descendente de mayor a menor número. Si existe empate, lanzan de nuevo los dados los participantes implicados, ganando la posición quien sacó mayor número.

4. Para iniciar el juego, los participantes colocarán sus fichas de avance en la casilla de Inicio “Origen del Universo / Big Bang”, lanzarán el dado en el orden en que previamente se habían clasificado. El jugador lanzara el dado y según el número que saque, avanza en el tablero, ubicándose en una “Casilla Elemento”. Al ubicarse en la casilla, debe representar con las “esferas magnéticas” de protones y neutrones, el núcleo de uno de los isótopos del elemento de la casilla; si arma correctamente el núcleo, tiene derecho a lanzar de nuevo el dado y avanzar en el juego, repitiendo el proceso anterior del armado del núcleo. Si no arma correctamente el núcleo, se devolverá a la casilla en la que estuvo ubicado anteriormente y esperará el próximo turno.
5. Los jugadores irán avanzando a medida que lanzan los dados, en el orden pactado al inicio.
6. Cuando luego de lanzar el dado, llega a una casilla “Pregunta” o “Reto”, deberá responder las preguntas o realizar el reto. Si realiza la actividad correctamente, lanzará el dado nuevamente y avanza en el juego. Si no realiza la actividad correctamente, se quedará en dicha casilla esperando el siguiente turno de lanzar el dado y seguir intentando realizar la actividad correctamente.

7. Los jugadores deberán avanzar hasta superar el elemento Uranio, que es el último elemento del juego.
8. Para terminar y ganar el juego general, el participante debe alcanzar la casilla “Universo”. Si se encuentra entre los últimos seis (6) elementos químicos, deberá sacar la cantidad precisa para llegar a la casilla Universo. Si no saca la cantidad necesaria, deberá avanzar normalmente o esperar a sacar el valor preciso cediendo el turno. Esta alternativa de llegada puede ser variada por los participantes.
9. El juego permite establecer otra variable para ganar, en la que se tiene en cuenta al hacer un balance general, la mayor cantidad de Tarjetas de Elementos adquiridas por cada jugador o equipo participante durante el Viaje a través de la Nucleosíntesis.

Variaciones del Juego:

El juego “Un Viaje a través de la Nucleosíntesis”, permite cambios o variaciones en sus reglas o instrucciones, las cuales pueden ser modificadas según el nivel de formación y de profundización de los estudiantes o participantes en el juego. Se puede jugar a través de las casillas de los elementos químicos, sin tener en cuenta (saltando) las casillas “Preguntas” y “Retos”, si aún no se han estudiado los temas relacionados o si se desea que la actividad sea más fluida.

Actividades adicionales con el Juego:

El docente con su creatividad puede utilizar elementos del juego como las “Tarjetas de los Elementos Químicos”, para realizar otras actividades académicas de apoyo, que permitan la consulta de información sobre cada uno de los elementos químicos, los procesos de Nucleosíntesis, la evolución estelar y la teoría del Big Bang, entre otras; interactuando igualmente con la “Tabla Periódica Digital sobre el origen de los elementos químicos” desarrollada y presentada en la sección 4.1., de este trabajo.

Por ejemplo, a cada estudiante se le asigna uno o varios elementos químicos, entregándoles sus correspondientes tarjetas; posteriormente, el estudiante podrá consultar la Tabla Periódica Digital para preparar el material y otras fuentes, como libros, revistas y páginas Web sobre el tema y así poder realizar el trabajo de investigación, según las indicaciones o rúbricas establecidas por el docente. Finalmente, cada estudiante o grupo de estudiantes socializarán en el aula de clase los trabajos realizados y compartirán sus experiencias sobre lo comprendido y aprendido.

Conclusiones

Tras la elaboración de este trabajo de investigación sobre el origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos estables en la naturaleza, se puede concluir que:

Los elementos químicos en el universo, en especial los 92 elementos estables en la naturaleza, que hacen parte de la estructura y composición de la tierra y se encuentran presentes en los seres vivos; tienen su origen astrofísico y cosmológico a partir del proceso de la Nucleosíntesis, la cual, de acuerdo a diferentes períodos o etapas y medios en el universo, se distinguen como Nucleosíntesis Primordial, Nucleosíntesis Estelar, Nucleosíntesis Explosiva y Nucleosíntesis Interestelar.

La Nucleosíntesis es en general el proceso mediante el cual, se elaboran o forman los elementos químicos en el universo; que a su vez cuenta con, una serie de procesos nucleares como la Cadena Protón-Protón, Fusión de Núcleos Alfa, Proceso-s, Proceso-r, Proceso-p, Desintegración Radiactiva y Fisión Nuclear; que de acuerdo a las condiciones de energía, temperatura, presión y densidad, del medio estelar o interestelar, propician la formación de los diferentes núcleos atómicos de los elementos químicos.

Mediante la Nucleosíntesis Primordial, se originaron los elementos químicos denominados ligeros como el Hidrógeno (H), el Helio (He) y trazas de Litio (Li). A través de la Nucleosíntesis Estelar, se logran formar los elementos livianos, desde el Carbono (C) hasta el Hierro (Fe) y algunos pesados desde el Hierro hasta el Bismuto (Bi). En la Nucleosíntesis

Explosiva o en Supernovas, también se sintetizan los elementos pesados desde el Hierro (Fe) hasta el Uranio (U). Y en cuanto a la Nucleosíntesis Interestelar, se forman elementos livianos como el Litio (Li), Berilio (Be) y Boro (B), por medio de Radiación Cósmica y otros elementos por Desintegración Radiactiva y Fisión Nuclear.

Los 92 elementos químicos estables estudiados en este trabajo cumplen de alguna forma específica una función en la naturaleza. Es así como se pueden encontrar elementos primarios o esenciales para la vida como el Carbono, el Hidrógeno, el Oxígeno y el Nitrógeno; otros secundarios como el Fósforo, el Calcio, Azufre, Magnesio, Sodio, Potasio y Cloro; y los Oligoelementos como el Hierro, Manganeso, Cobre, Zinc, Flúor, Yodo, Boro, Silicio, Vanadio, Cromo, Cobalto, Selenio, Molibdeno y Estaño. Además de encontrasen otros elementos que de alguna forma pueden estar en los organismos vivos, pero que no realizan una función vital, como el Helio, el Argón y el Xenón, entre otros. Igualmente existen otros que por sus características de toxicidad y radiactividad son nocivos para la vida, como el Polonio, el Radio, el Torio, el Protactinio y el Uranio.

Se ha logrado elaborar una Tabla Periódica Digital Interactiva sobre el origen de los elementos químicos, como producto de este trabajo de investigación documental, donde se compila una gran cantidad de información con respecto a los 92 elementos estables en la naturaleza, en cuanto a sus isótopos, origen en el universo, reacciones de nucleosíntesis, abundancia e importancia para la vida. Dicha Tabla Periódica, se podrá consultar en el Sitio Web con el enlace o link: <http://urania.udea.edu.co/users/jlara/>

Se diseñó y elaboró el juego didáctico: “Un viaje a través de la nucleosíntesis”, como Recurso o Material Didáctico para la enseñanza sobre el origen de los elementos químicos en el universo; el cual permite de una forma lúdica conocer, comprender y afianzar los conceptos teóricos sobre el origen de la materia en el universo, según la teoría del Big Bang.

Estos trabajos de profundización son muy importantes porque permiten investigar y conocer a fondo un tema específico, para plantear y generar nuevos métodos, herramientas tecnológicas, didácticas y metodologías, para la enseñanza de las ciencias naturales a nivel escolar, de la básica secundaria, media y la educación superior.

Recomendaciones

Finalmente, con la elaboración de este trabajo de investigación sobre el origen astrofísico y cosmológico de los elementos químicos estables en la naturaleza, surgen algunas recomendaciones:

Realizar actualizaciones y mejoramientos del contenido de la Tabla Periódica Digital Interactiva con el Origen de los Elementos Químicos, de acuerdo a los nuevos avances, descubrimientos científicos y tecnológicos.

Con respecto a la información estudiada y compilada en este trabajo, es importante promover y desarrollar nuevas investigaciones que profundicen en el campo de la astrofísica y la astronomía, en cuanto a los procesos de nucleosíntesis, evolución estelar, fusión y fisión nuclear, entre otros aspectos.

Este trabajo con sus contenidos teóricos, su producto digital interactivo y didáctico, se debe potenciar como material educativo para la enseñanza de las ciencias naturales a nivel escolar, de la básica secundaria y media; al igual que su información puede ser importante para el desarrollo de nuevas investigaciones en la educación superior.

Finalmente es importante incursionar con creatividad en el desarrollo de nuevos materiales didácticos para mejorar, hacer más atractiva e interesante la enseñanza de las ciencias naturales en todos sus campos de estudio.

Referencias bibliográficas

- Acosta, A. C., y Martín, S. L. (2009). Las TICs como herramienta de investigación científica. *Gondola: Enseñanza Aprendizaje de las Ciencias*, 4(1), 25.
- Actinio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Actinio>
- Actinio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ac.htm>
- Actinio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/actinium/>
- Aguilar Cuevas, O., Castro Ramírez, R., Sánchez Gracia, J., López Sandoval, H. y Barba Behrens, N. (2011). Química inorgánica medicinal: vanadio, platino, oro. *Educ. quim.*, 23(1), 33-40. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx/pdf/eq/v23n1/v23n1a6.pdf>
- Aluminio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Aluminio>
- Aluminio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/al.htm>
- Aluminio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/aluminium/>
- Antimonio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Antimonio>
- Antimonio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/sb.htm>
- Antimonio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/antimony/>
- Argón. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ar.htm>
- Argón. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/argon/>
- Argón. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Arg%C3%B3n>
- Arsénico. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ars%C3%A9nico>
- Arsénico. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/as.htm>
- Arsénico. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/arsenic/>
- Azufre. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/s.htm>

Azufre. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/sulfur/>

Azufre. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Azufre>

Astato. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%81stato>

Astato. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/at.htm>

Astato. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/astatine/>

Bachelard, G. (1981). *La Formación del Espíritu Científico*. 9 Ed. Buenos Aires: Argos, 299 p.

Bahena, D., Klapp, J. and Dehnen, H. (2007). First stars evolution and nucleosynthesis. *Revista Mexicana de Física*, 53 (6), 48-53. Recuperado de https://rmf.smf.mx/pdf/rmf-s/53/6/53_6_48.pdf

Bario. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Bario>

Bario. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ba.htm>

Bario. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/barium/>

Berilio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/beryllium/>

Berilio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Berilio>

Berilio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/be.htm>

Bethe, H. A. y Brown, G. (1985). Así explota una supernova. *Investigación y Ciencia*, (106), 98-107

Bismuto. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Bismuto>

Bismuto. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/bi.htm>

Bismuto. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/bismuth/>

Boro. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/boron/>

Boro. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/b.htm>

Boro. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Boro>

Bromo. Recuperado de bioquímica:

<http://www.bioquimica.dogsleep.net/Teoria/archivos/Unidad10.pdf>

Bromo. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Bromo>

Bromo. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/br.htm>

Bromo. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/bromine/>

Cadmio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cadmio>

Cadmio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cd.htm>

Cadmio. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/48/cadmium>

Cadmio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/cadmium/>

Calcio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ca.htm>

Calcio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/calcium/>

Calcio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Calcio>

Camargo Ayala, A.L. (2014). *Estrategia didáctica para la enseñanza de la química orgánica utilizando cajas didácticas con modelos moleculares para estudiantes de media vocacional*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 84 p.

Recuperada de <http://www.bdigital.unal.edu.co/39522/1/analcamargoa2014..pdf>

Campos Granados, C.M. (2015). El impacto de los micronutrientes en la inmunidad de los animales. *Nutrición Animal Tropical*, 9 (1), 1-23. Recuperado de

<https://dialnet.unirioja.es/descarga/articulo/5166282.pdf>

Carbono. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Carbono>

Carbono. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/carbon/>

Carbono. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/c.htm>

Carmona Guzmán, E. (2013). Elementos químicos, moléculas y vida. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat.*, 106(1-2), 69-80. Recuperado de <http://www.rac.es/ficheros/doc/01101.pdf>

Causado Moreno, A.V. (2012). *Diseño e implementación de una estrategia didáctica para la enseñanza-aprendizaje de la Tabla Periódica y sus propiedades en el grado octavo utilizando las nuevas tecnologías TICs: Estudio de caso en la Institución Educativa Alfonso López Pumarejo grupo 8-2* (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia, Medellín. Recuperada de

<http://www.bdigital.unal.edu.co/5862/1/43619825.2012.pdf>

Cerio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cerio>

Cerio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ce.htm>

Cerio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/cerium/>

Cesio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cesio>

Cesio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cs.htm>

Cesio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/caesium/>

Chavero, C. (2014). *Poblaciones estelares*. Escuela Colombiana de Astronomía. Recuperado de:

<http://ciencias.bogota.unal.edu.co/fileadmin/content/oan/imagenes/eventos/escuelacolombianaastronomia/escuelaVI/CHAVERO1.pdf>

Circonio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Circonio>

Circonio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/zr.htm>

Circonio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/zirconium/>

Cloro. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cl.htm>

Cloro. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/chlorine/>

Cloro. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cloro>

Cobalto. Recuperado de eltamiz: <http://eltamiz.com/2011/10/05/conoce-tus-elementos-el-cobalto/>

Cobalto. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cobalto>

Cobalto. Recuperado de repositorio:

<http://repositorio.ual.es:8080/bitstream/handle/10835/3133/F13.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Cobalto. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/co.htm>

Cobalto. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/cobalt/>

Cobre. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cobre>

Cobre. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cu.htm>

Cobre. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/copper/>

Coc, A. (2012). *Primordial Nucleosynthesis*. 15 p. Recuperado de

<https://arxiv.org/pdf/1208.4748.pdf>

Coc, A., Vangioni, E. (2017). Primordial nucleosynthesis. *International Journal of Modern*

Physics E. (Jul. 5), 21 p. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/1707.01004.pdf>

Colombia. Congreso de la República. *Ley general de la educación: Ley 115* (8, febrero, 1994).

Por la cual se expide la ley general de educación. Bogotá: Momo Ediciones

Comellas, J. L. (1999). *El mundo de las estrellas*. Madrid: Equipo Sirius. 214 p.

Contreras Cadena, D. A., Gómez Pech, C., Rangel García, M., Ruiz Hernández, A., Martínez

Bulit, P., y Barba Behrens, N. (2014). La importancia del vanadio en los seres vivos.

Educ. quím., 25(E1), 245-253. Recuperado de

<https://core.ac.uk/download/pdf/82027771.pdf>

<http://www.revistas.unam.mx/index.php/req/article/download/46161/41295>

Corral, M. A. M. *El origen de los elementos químicos*. Recuperado de

<http://www.elementos.buap.mx/num12/pdf/84.pdf>

Cortina Gil, D. y Martínez Pinedo, G. (2008). Núcleos en el Universo. *Temas de física*, (Enero-

Marzo). Recuperado de <https://www.i-cpan.es/doc/Empirika/14-21-Nucleos-Universo.pdf>

Cromo. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/cr.htm>

Cromo. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/chromium/>

Cromo. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cromo>

Disproso. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Disproso>

Disproso. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/dy.htm>

Disproso. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/dysprosium/>

Erbio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Erbio>

Erbio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/er.htm>

Erbio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/erbium/>

Escalante, S., y Gasque, L. (2012). El origen de los elementos y los diversos mecanismos de nucleosíntesis. *Educación química*, 23(1), 62-68. Recuperado de [http://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/4361/mod_resource/content/2/EI%20Origen%20de%20los%20elementos%20\(EducacionQuimica\).pdf](http://amyd.quimica.unam.mx/pluginfile.php/4361/mod_resource/content/2/EI%20Origen%20de%20los%20elementos%20(EducacionQuimica).pdf)

Escalante Tovar, S. (2016). *Origen de los elementos químicos: nucleogénesis y nucleosíntesis*.

Recuperado de <http://docplayer.es/44275938-Nucleogenesis-y-nucleosintesis.html>

Escandio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/scandium/>

Escandio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/sc.htm>

Escandio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Escandio>

Estaño. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Esta%C3%B1o>

Estaño. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/sn.htm>

Estaño. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/tin/>

Estroncio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Estroncio>

Estroncio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/sr.htm>

Estroncio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/strontium/>

- Europio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Europio>
- Europio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/eu.htm>
- Europio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/europium/>
- Fernández, A. G. (2010). *Recursos didácticos: elementos indispensables para facilitar el aprendizaje*. México: Limusa.
- Ferrer, J., García, V. y García, R. (2013). Curso completo de HTML. Recuperado de: <http://es.tldp.org/Manuales-LuCAS/doc-curso-html/doc-curso-html.pdf>
- Flúor. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Fl%C3%BAor>
- Flúor. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/fluorine>
- Flúor. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/f.htm>
- Fósforo. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/p.htm>
- Fósforo. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/phosphorus/>
- Fósforo. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3sforo>
- Francio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Francio>
- Francio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/francium/>
- Francio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/fr.htm>
- Gadolinio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Gadolinio>
- Gadolinio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/gd.htm>
- Gadolinio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/gadolinium/>
- Gal-Yam, A. (2012). Super supernovas. *Investigación y ciencia*, (431), 24-29. Recuperado de <https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/el-ecosistema-interior-556/super-supernovas-9350>

Galindo Tixaire, A. (2005). La nueva cosmología: principio y fin del universo. *Rev. R. Acad.*

Cienc. Exact. Fis. Nat., 99 (1),113-159. Recuperado de

<http://www.rac.es/ficheros/doc/00606.pdf>

Galio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Galio>

Galio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ga.htm>

Galio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/gallium/>

Germanio. Recuperado Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Germanio>

Germanio. Recuperado lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ge.htm>

Germanio. Recuperado webelements: <https://www.webelements.com/germanium/>

Goulet Gorguet, A. (2009). *Los juegos didácticos: una alternativa en el proceso de enseñanza aprendizaje de la nomenclatura y notación química de las sustancias inorgánicas en la*

secundaria básica “José Miguel Bañuls Perera. Recuperado de:

<http://www.eumed.net/libros-gratis/2013a/1287/1287.pdf>

Guasp, J. (1975). *Introducción a la nucleosíntesis*. Madrid. Junta de Energía Nuclear. 112 p.

Recuperado de <http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/~acorsico/ie/IntEst04.pdf>

Hafnio. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Hafnium>

Hafnio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/hf.htm>

Hafnio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/hafnium/>

Hanesian, H., Ausubel, D. y Novak, J. (1991). *Psicología Educativa: Un punto de Vista*

Cognitivo. 5 Ed. México: Trillas, 663p.

Helio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Helio>

Helio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/he.htm>

Helio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/helium/>

Heras, A. *Introducción a la astronomía y astrofísica*. Recuperado de:

<http://antonioheras.com/index.htm>

Hidrógeno. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/hydrogen/>

Hidrógeno. Recuperado de <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa2/n2/e2.html>

Hidrógeno. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3geno>

Hidrógeno. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/h.htm>

Hidrógeno. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/1/hydrogen>

Hierro. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Hierro>

Hierro. Recuperado de agroes: <http://www.agroes.es/agricultura/abonos/124-hierro-funcion-nutricion-plantas>

Hierro. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/fe.htm>

Hierro. Recuperado de rdnatural: <http://www.rdnatural.es/blog/hierro/>

Hierro. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/iron/>

Hillebrandt, W., Janka, H. T. y Müller, E. (2006). Supernovas. *Investigacion y Ciencia*, (363), 17-23

Holmio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Holmio>

Holmio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/ho.htm>

Holmio. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/67/holmium>

Holmio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/holmium/>

HyperPhysics. (2017). Georgia: University. Department of Physics and Astronomy. Recuperado de <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/hframe.html>

Importancia del hidrógeno. Recuperado de <https://www.importancia.org/hidrogeno.php>

Indio. Recuperado de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Indio_\(elemento\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Indio_(elemento))

Indio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/in.htm>

Indio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/indium/>

Institución Educativa Rural Benigno Mena González. (2017). *Proyecto Educativo Institucional PEI*. San Jerónimo. Recuperado de <https://ierbenignomenagonzalez.es.tl/PEI.htm>

Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial «Esteban Terradas». (2009). *100 Conceptos básicos de Astronomía*. Madrid. 100 p. Recuperado de <https://www.sea-astronomia.es/drupal/sites/default/files/archivos/100%20Conceptos%20Astr.pdf>

International Molybdenum Association. *Molibdeno esencial para la vida*. 12 p. Recuperado de: http://www.imoa.info/download_files/sustainability/Molibdeno_Esencialidad.pdf

Iridio. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Iridium>

Iridio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/ir.htm>

Iridio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/iridium/>

Iterbio. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Ytterbium>

Iterbio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/yb.htm>

Iterbio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/ytterbium/>

Itrio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Itrio>

Itrio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/y.htm>

Itrio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/yttrium/>

Jacobo, S.E. Nucleogénesis. *Química Inorgánica*, (63.13.) Recuperado de <http://materias.fi.uba.ar/6303/Nucleogenesis.pdf>

Jara Campos, R. A. (2012). *Modelos didácticos de profesores de química en formación inicial*. (Tesis doctoral). Pontificia Universidad Católica de Chile. 268 p. Recuperada de http://www7.uc.cl/sw_educ/educacion/grecia/plano/html/pdfs/biblioteca/DOCTOR/TESIS ROXAJARA.pdf

- José, J. *New trends in explosive nucleosynthesis*. Barcelona. Universidad Politécnica de Catalunya. Recuperado de [https://www.euroschoolonexoticbeams.be/site/files/2010_Euroschool_2010\(I\)_Jordi%20I.pdf](https://www.euroschoolonexoticbeams.be/site/files/2010_Euroschool_2010(I)_Jordi%20I.pdf) [https://www.euroschoolonexoticbeams.be/site/files/2010_JJose\(2\)_Jordi%20II.pdf](https://www.euroschoolonexoticbeams.be/site/files/2010_JJose(2)_Jordi%20II.pdf)
- Krane, Kenneth S. (1987). *Introductory Nuclear Physics*. New York: John Wiley & Son. pp. 777. Recuperado de <http://www.fulviofrisone.com/attachments/article/446/Krane%20-%20Introductory%20Nuclear%20Physics.pdf>
- Kriptón. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Kript%C3%B3n>
- Kriptón. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/kr.htm>
- Kriptón. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/krypton/>
- Lamarca Lapuente, M. J. (8 de diciembre de 2013). *Hipertexto: El nuevo concepto de documento en la cultura de la imagen* (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid. Recuperado de: <http://www.hipertexto.info>
- Langer, N. (2012). *Nucleosynthesis*. Bonn University. 118 p. Recuperado de https://astro.uni-bonn.de/~nlanger/siu_web/nucscript/Nucleo.pdf
- Lantano. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Lantano>
- Lantano. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/la.htm>
- Lantano. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/lanthanum/>
- Litio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Litio>
- Litio. Recuperado de <http://www.taringa.net/post/ciencia-educacion/8712904/La-Importancia-del-Litio.html>
- Litio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/li.htm>
- Litio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/lithium/>
- Lutecio. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lutetium>

- Lutecio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/lu.htm>
- Lutecio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/lutetium/>
- Lochner, C., Rohrbach, G. and Cochrane, K. (2003). *What is cosmic connection to the elements?* Nasa. 40 p. Recuperado de https://www.nasa.gov/pdf/190387main_Cosmic_Elements.pdf
- Llorca, J. Sobre el origen y distribución de los elementos en la enseñanza de la química. En *Química en acción*. Universidad de Barcelona. 240-248. Recuperado de <http://quim.iqi.etsii.upm.es//vidacotidiana/QVCParte4.pdf>
- Magnesio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Magnesio>
- Magnesio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/magnesium/>
- Magnesio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/mg.htm>
- Manganeso recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/mn.htm>
- Manganeso recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/mn.htm>
- Manganeso recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/manganese/>
- Manganeso recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Manganeso>
- Mashnik, S.G. (2000). On Solar System and Cosmic Rays Nucleosynthesis and Spallation Processes. *Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-00-3658*. 46 p. Recuperado de <https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0008382.pdf>
- Méndez Ortiz, V., Ruiz Hernández, L. A. y Figueroa Alcántara, H. A. (2007). Recursos digitales y multimedia. En H. A. Figueroa Alcántara y C. A. Ramírez Velázquez. *Tecnología de la información* (pp. 61-72). México: UNAM, Facultad de Filosofía y Letras: Dirección General de Asuntos del Personal Académico.
- Mercurio. Recuperado de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Mercurio_\(elemento\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Mercurio_(elemento))
- Mercurio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/hg.htm>
- Mercurio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/mercury/>

Ministerio de Educación Nacional (2012). Programa todos a aprender. Recuperado de:

http://www.mineducacion.gov.co/1621/articles-310659_archivo_pdf_sustentos_junio27_2013.pdf

Molibdeno. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Molibdeno>

Molibdeno. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/mo.htm>

Molibdeno. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/molybdenum/>

Morales, E. (s.f.). Curso de HTML 4.0. Recuperado de:

<http://www.uprm.edu/cti/docs/manuales/manuales-espanol/windows/manuales/html.pdf>

Muñoz Razo, C. (2011). Clasificación de los tipos de tesis. *En Cómo elaborar y asesorar una investigación de tesis*. México: Pearson. pp. 14. Recuperado de

<http://www.unamerida.com/documentos/bileidis/ElaborarTesis.pdf>

Naranjo Cardona, W. (2013). *Método pedagógico para emplear los conocimientos químicos adquiridos por los alumnos del décimo grado en la construcción de las estructuras de Gilbert N. Lewis para la formación de moléculas*. (Tesis de maestría). Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 101 p. Recuperada de

<http://www.bdigital.unal.edu.co/11748/1/98557339.2014.pdf>

Nasa-Diccionario de Astronomía. Recuperado de <https://www.astromia.com/glosario/>

Neodimio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Neodimio>

Neodimio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/nd.htm>

Neodimio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/neodymium/>

Neón. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ne%C3%B3n>

Neón. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/neon/>

Neón. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ne.htm>

Niobio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Niobio>

- Niobio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/nb.htm>
- Niobio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/niobium/>
- Níquel. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Oligoelemento>
- Níquel. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ni.htm>
- Níquel. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/nickel/>
- Nitrógeno. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Nitr%C3%B3geno>
- Nitrógeno. Recuperado de artinaid: <http://www.artinaid.com/2013/04/el-nitrogeno/>
- Nitrógeno. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/n.htm>
- Nitrógeno. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/nitrogen/>
- Nordberg, G. Metales: propiedades químicas y toxicidad (1998). En *Enciclopedia de la salud y seguridad en el trabajo*. Madrid. OIT. pp. 63.3-63.51. Recuperada de <http://paginas.facmed.unam.mx/deptos/sp/wp-content/uploads/2013/12/Enciclopedia-de-salud-y-seguridad-en-el-trabajo.pdf>
- Novak, J. y Gowin, D. B. (1988). *Aprendiendo a Aprender*. Barcelona: Martínez Roca, 228 p.
- Nuclear reactions in nature: nuclear astrophysics*. Recuperado de <http://oregonstate.edu/instruct/ch374/ch418518/Chapter%2012.pdf>
- Nucleosíntesis. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis>
- Nucleosíntesis primordial. Recuperada de: https://es.wikipedia.org/wiki/Nucleos%C3%ADntesis_primordial
- Olmo, M. y Nave, R. (2010). HyperPhysics – Astrofísica. Recuperado de: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Astro/bbcloc.html#c1>
- Oro. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Oro>
- Oro. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/au.htm>
- Oro. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/79/gold>

Oro. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/gold/>

Osmio. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Osmium>

Osmio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/os.htm>

Osmio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/osmium/>

Oxigeno. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ox%C3%ADgeno>

Oxigeno. Recuperado de webelements <https://www.webelements.com/oxygen/>

Oxigeno. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/o.htm>

Paladio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Paladio>

Paladio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pd.htm>

Paladio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/palladium/>

Plata. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Plata>

Plata. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ag.htm>

Plata. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/47/silver>

Plata. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/silver/>

Platino. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Platino>

Platino. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pt.htm>

Platino. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/platinum/>

Plomo. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Plomo>

Plomo. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm>

Plomo. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/lead/>

Polonio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Polonio>

Polonio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/po.htm>

Polonio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/polonium/>

Potasio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/k.htm>

Potasio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/potassium/>

Potasio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Potasio>

Praseodimio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Praseodimio>

Praseodimio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pr.htm>

Praseodimio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/praseodymium/>

Prometio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Prometio>

Prometio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pm.htm>

Prometio. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/61/promethium>

Prometio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/promethium/>

Prometio. Recuperado de vix: <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/4888/caracteristicas-del-prometio>

Protactinio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Protactinio>

Protactinio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/pa.htm>

Protactinio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/protactinium/>

Radio. Recuperado de Wikipedia: [https://es.wikipedia.org/wiki/Radio_\(elemento\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Radio_(elemento))

Radio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ra.htm>

Radio. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/88/radium>

Radio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/radium/>

Radón. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Rad%C3%B3n>

Radón. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/rn.htm>

Radón. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/radon/>

Reacciones de nucleosíntesis recuperadas de: <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/32/4/007/meta> <http://www.fullquimica.com/2013/03/transmutacion-nuclear.html>

<http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=136399>

<https://link.springer.com/article/10.1140/epja/i2017-12253-2>

[http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/ensdf/getrefs.jsp?recid=55025004&dsid=51V\(6LI,D\)%20E=32%20MEV](http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/ensdf/getrefs.jsp?recid=55025004&dsid=51V(6LI,D)%20E=32%20MEV) <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.94.025804>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.88.045802>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.88.011603>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.76.055807>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.92.045805>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.82.035504>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.71.052801>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.94.045801>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.94.055803>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.93.025804>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.44.1675>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.87.025806>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.85.015803>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.93.045810>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.67.015807>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.88.045804>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.117.222302>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.111.112501>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.83.065807>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.107.252502>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.91.044318>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.71.024603>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.113.232502>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.91.015808>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.71.037303>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.93.161103>

<https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.96.024313>

<http://www.educarchile.cl/ech/pro/app/detalle?ID=136399>

<http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/DatasetFetchServlet>

<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01597553>

<https://journals.aps.org/prl/abstract/10.1103/PhysRevLett.33.1108>

<https://www.google.com.co/search?q=fe54+nucleosynthesis&tbm=isch&tbo=u&source=univ&sa=X&ved=0ahUKEwj9s6rAmbTWAhWRxiYKHf38CS8QsAQIOQ&biw=1916&bih=954>

https://scholar.google.es/scholar?q=127i+nucleosynthesis+reactions&btnG=&hl=es&as_sdt=0%2C5 <https://journals.aps.org/prc/abstract/10.1103/PhysRevC.44.2801>

https://books.google.com.co/books?id=kLZNCAAAQBAJ&pg=PA502&lpg=PA502&dq=159tb+nucleosynthesis+reactions&source=bl&ots=IAF4CjfYac&sig=qb3s_8H8_MbWo gE8qly57ER6GRY&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjklqWR6pXAhXGKiYKHZcLCNM Q6AEIYjAI#v=onepage&q=159tb%20nucleosynthesis%20reactions&f=false

<https://books.google.com.co/books?id=CACyDQAAQBAJ&pg=PA149&lpg=PA149&dq=os+192+nucleosynthesis+reactions&source=bl&ots=a0XufJnnkH&sig=JHstyeLRDgAP UECItDoIGsH9ANA&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjyvJCqrvvWAhVG1CYKHQ9eDm MQ6AEIQzAE#v=onepage&q=os%20192%20nucleosynthesis%20reactions&f=false>

<http://ring.geoscienceworld.org/content/81/1/107> <https://arxiv.org/pdf/1608.08634.pdf>

<https://ac.els-cdn.com/S0090375217300029/1-s2.0-S0090375217300029->

main.pdf?_tid=1d718ae6-a099-11e7-9f5f-

00000aacb361&acdnat=1506196694_e010dd80887ffe591a508efc55b5b651

<http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0954-3899/41/5/053101/pdf>

<http://oregonstate.edu/instruct/ch374/ch418518/Chapter%2012.pdf>

<https://arxiv.org/find/all/1/all:+AND+t1+nucleosynthesis/0/1/0/all/0/1>

https://www-nds.iaea.org/publications/staff_pub.php <https://arxiv.org/pdf/1310.5667.pdf>

Rebusco, P., Boffin, H. and Pierce-Price, Douglas. (2007). Fusion in the universo: where your jewellery comes from. *Science in School*, (5), 52-56. Recuperado de

http://www.scienceinschool.org/sites/default/files/teaserPdf/issue5_fusion.pdf

Renio. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Rhenium>

Renio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/re.htm>

Renio. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/75/rhenium>

Renio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/rhenium/>

Rodio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Rodio>

Rodio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/rh.htm>

Rodio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/rhodium/>

Rodríguez S., M., y Flórez R., V. J. (2004). Elementos esenciales y beneficiosos. En *Nociones Básicas del Ferti-riego*. Bogotá. Universidad nacional de Colombia. pp. 25-36.

Recuperado de

<http://repositorio.ual.es:8080/bitstream/handle/10835/3133/F13.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Rose, w. k. (1993). Thermonuclear reactions and nucleosynthesis. En *Advanced stellar astrophysics*. New York. Cambridge University Press. 212-235.

- Rota Font, F. *Extensiones del modelo estándar del universo primitivo: nucleosíntesis primordial axiones y materia oscura*. Universidad autónoma de Barcelona. (Tesis doctoral). 206 p.
recuperada de
<http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/3369/frf1de1.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Rubidio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Rubidio>
- Rubidio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/rb.htm>
- Rubidio. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/37/rubidium>
- Rubidio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/rubidium/>
- Rutenio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Rutenio>
- Rutenio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ru.htm>
- Rutenio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/ruthenium/>
- Samario. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Samario>
- Samario. Recuperado de iquimicas: <https://iquimicas.com/samario-sirve-elemento-quimico-sm-2/>
- Samario. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/sm.htm>
- Samario. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/samarium/>
- Samario. Recuperado de vix: <http://www.vix.com/es/btg/curiosidades/4901/caracteristicas-del-samario>
- Satorre Aznar, M. A. (1998). *Evolución de la materia en el espacio: modelo de laboratorio para aplicaciones astrofísicas*. (Tesis doctoral). Universidad de Alicante. Recuperada de
<https://rua.ua.es/dspace/bitstream/10045/4022/1/Satorre-Aznar-Miguel-Angel.pdf>
- Schiavo, E. (2007). Investigación científica y tecnológica en el campo de las TIC:
¿conocimientos técnicos, contextuales o transversales? *Revista iberoamericana de ciencia tecnología y sociedad*, 3(9), 91-113.

Selenio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Selenio>

Selenio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/se.htm>

Selenio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/selenium/>

Sepúlveda Soto, A. (2014). *Bases de astrofísica*. Medellín: Editorial Universidad de Antioquia.
249 p.

Serway, R. A., Moses, C. J. y Moyer, C. A. (2006). Estructura nuclear. *En Física moderna*.
México. Thomson. Pp. 463-479

Silicio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/si.htm>

Silicio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/silicon/>

Silicio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Silicio>

Sodio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Sodio>

Sodio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/na.htm>

Sodio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/sodium/>

Supernova. Recuperada de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Supernova>

Tabla periódica. Recuperada de Figshare:

https://figshare.com/articles/Periodic_Table_of_Nucleosynthesis/1595995

Tabla periódica. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/periodic-chart.htm>

Tabla periódica. Recuperado de ptable: <https://ptable.com/?lang=es>

Tabla periódica. Recuperado de The chemogenesis: http://www.meta-synthesis.com/webbook/35_pt/pt_database.php?PT_id=593

Tabla periódica. Recuperada de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table>

Tabla periódica. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/>

Tabla periódica. Recuperada de Wikipedia:

https://es.wikipedia.org/wiki/Tabla_peri%C3%B3dica_de_los_elementos

Talio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Talio>

Talio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/tl.htm>

Talio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/thallium/>

Tancredi, G. (s.f.). *El origen de los elementos químicos*, p. 30. Montevideo, Uruguay:

Departamento Astronomía, Instituto de Física, Facultad de Ciencias. Recuperada

de:[http://www.cte.edu.uy/Materiales/PowerPoint/Espacio/El%20Origen%20de%20los%20](http://www.cte.edu.uy/Materiales/PowerPoint/Espacio/El%20Origen%20de%20los%20Elementos%20Quimicos.ppt)

[0Elementos%20Quimicos.ppt](http://www.cte.edu.uy/Materiales/PowerPoint/Espacio/El%20Origen%20de%20los%20Elementos%20Quimicos.ppt)

Tantalio. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tantalum>

Tantalio. Recuperado de ecured: <https://www.ecured.cu/Tantalio>

Tantalio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/ta.htm>

Tantalio. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/73/tantalum>

Tantalio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/tantalum/>

Tecnecio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Tecnecio>

Tecnecio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/tc.htm>

Tecnecio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/technetium/>

Telurio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Telurio>

Telurio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/te.htm>

Telurio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/tellurium/>

Terbio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Terbio>

Terbio. Recuperado de iquimicas: <https://iquimicas.com/terbio-sirve-elemento-quimico-tb/>

Terbio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/tb.htm>

Terbio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/terbium/>

Titanio. Recuperada de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ti.htm>

Titanio. Recuperada de webelements: <https://www.webelements.com/titanium/>

Titanio. Recuperada de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Titanio>

Torio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Torio>

Torio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/th.htm>

Torio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/thorium/>

Tulio. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Thulium>

Tulio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/tm.htm>

Tulio. Recuperado de rsc: <http://www.rsc.org/periodic-table/element/69/thulium>

Tulio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/thulium/>

Tungsteno. Recuperado de Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Tungsten>

Tungsteno. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.com/periodic/elements/w.htm>

Tungsteno. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/tungsten/>

Tungsteno. Recuperado de ecured: <https://www.ecured.cu/Wolframio>

Uranio. Recuperado de

<http://diarium.usal.es/guillermo/files/2014/02/NEJul2005UranioElementoDesconocido.pdf>
f

Uranio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Uranio>

Uranio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/u.htm>

Uranio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/uranium/>

Valero Molina, R. (2013). El sistema periódico y su relación con la vida cotidiana. *An. Quim.* 109 (4), 301-307. Recuperado de:

<http://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/38/38>

Vega Velásquez, A. (2015). *Características de los contenidos digitales multimedia. Notas de clase para el curso Contenidos Multimedia* (Documento no publicado). Medellín:

Universidad Pontificia Bolivariana, Escuela de Ciencias Sociales, Facultad de
Comunicación Social-Periodismo, Maestría en Comunicación Digital.

Velásquez Monroy, y M. L., Ordorica Vargas, M. A. (2008). *Composición Química de los Seres Vivos*. 12 p. Recuperado de
<http://www.bioquimica.dogsleep.net/Teoria/archivos/Unidad10.pdf>

Velásquez Monroy, M. L., Ordorica Vargas, M.A. (2008). *Composición Química del organismo humano*. 12 p. Recuperado de
<https://www.yumpu.com/es/document/view/14105553/composicion-quimica-del-organismo-humano/3>

Vanadio. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/v.htm>

Vanadio. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/vanadium/>

Vanadio. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Vanadio>

Viola, V. E. (1986). Nucleosynthesis of the chemical elements. *Treb. Soc. Cat Biol.*, 39, 49-71.
Recuperado de <http://publicacions.iec.cat/repository/pdf/00000097%5C00000052.pdf>

Vucetich, H. (2004). *Interiores estelares*. Recuperado de
<http://www.fcaglp.unlp.edu.ar/~acorsico/ie/IntEst04.pdf>

Weinberg, S. (2016). *Los tres primeros minutos del universo*. Madrid: Alianza Editorial. 271 p.

White, W. M. (2003). Cosmoquímica. *En Geochemistry*. Valencia. International Mine Water Association. 421-473. Recuperado de
<http://personales.upv.es/lalonso/Traducciones/GEOQU%3%8DMICA.pdf>

Wright, Edward L. (2012). Big Bang Nucleosynthesis. Recuperado de
<http://www.astro.ucla.edu/~wright/BBNS.html>

Xenón. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Xen%C3%B3n>

Xenón. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/xo.htm>

Xenón. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/xenon/>

Yodo. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Yodo>

Yodo. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/i.htm>

Yodo. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/iodine/>

Zinc. Recuperado de Wikipedia: <https://es.wikipedia.org/wiki/Zinc>

Zinc. Recuperado de repositorio

<http://repositorio.ual.es:8080/bitstream/handle/10835/3133/F13.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zinc. Recuperado de lenntech: <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/zn.htm>

Zinc. Recuperado de webelements: <https://www.webelements.com/zinc/>

Zuluaga Callejas, J. (1998). Introducción a la astrofísica. Recuperada de

<https://es.slideshare.net/Agacio1/zuluaga-jorge-introduccion-a-la-astrofisica>

Zuluaga Callejas, J. (2007). Fundamentos de astrofísica: notas del curso. Medellín: Universidad de Antioquia. Recuperada de

<https://es.scribd.com/document/41856428/FundamentosAstrofisicaZuluaga-Completo>

Zuluaga Callejas, J. (25 de Julio 2016). Ondas gravitacionales: una conexión con la vida.

Recuperada de <http://www.investigacionyciencia.es/blogs/astronomia/76/posts/ondas-gravitacionales-una-conexin-con-la-vida-14334>