



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología

REVISIÓN DE LOS MECANISMOS DE CERTIFICACIÓN DE ORIGEN DE HIDRÓGENO Y SUS RECOMENDACIONES PARA SU ADOPCIÓN EN COLOMBIA.

Presentado para obtener el título de

MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Katherine Bustos Triana

Ever Nicolás Camelo Parra

Dirección:

Director: Julián Eduardo González Martínez

Co-Director: Luis Miguel Diazgranados Berenguer

Universidad del Rosario

Escuela de Ingeniería, Ciencia y Tecnología

Maestría en Energías Renovables

2024

DEDICATORIA

A mis padres, Ever y Sandra por el apoyo incondicional que me han brindado todos estos años para alcanzar mis metas profesionales; por ser mis guías y consejeros en todo momento.

A mi hermana Sofía por llenarme de alegría la vida y hacerme un mejor ser humano.

A mi familia en general por depositar su fe en mí, y apoyarme en cada uno de mis proyectos.

A Daniela, por acompañarme incondicionalmente durante esta etapa académica.

Los amo

Nicolás Camelo

Dedico este trabajo a las personas que me acompañaron (Padres, hermano, novio y profesores) en este camino el cual me brinda un logro más en mi carrera profesional.

Gracias al universo, a Dios y a mi familia.

Katherine Bustos

AGRADECIMIENTOS

A la Fundación Tomas Rueda Vargas cuyo trabajo a lo largo de los últimos 50 años ha permitido que cientos de estudiantes lleguen a la academia y puedan alcanzar su meta de ser más para servir mejor.

A la empresa EXPRO Gulf Limited, en especial a Dora Piedrahita por su guía, consejo, apoyo y por permitirme cursar esta maestría.

A la universidad del Rosario su Escuela de ingeniería y a los profesores Maria Fernanda Gomez, Julian Gonzalez y Luis Miguel Diazgranados por el apoyo brindado durante el desarrollo de este proyecto.

RESUMEN

Las políticas de transición energética mundial han impulsado que el interés por el desarrollo de aplicaciones de hidrógeno crezca exponencialmente durante los últimos años, con el objetivo de identificar un vector energético que ayude a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero y que sea una alternativa para sustituir los combustibles tradicionales e insumos necesarios en diferentes procesos industriales. [1]

La hoja de ruta de hidrógeno publicada por el Gobierno Nacional ratifica el interés y los lineamientos necesarios para la producción de hidrógeno verde y de bajas emisiones, y postula a Colombia como uno de los principales productores de dicho vector energético en la región, incluso hasta el punto de considerar la posible futura exportación en donde la demanda para regiones como Corea, Japón, Estados Unidos India y la Unión Europea, será para el 2050 de 99 Mt.[2]. La Unión Europea, Japón, Corea de Sur y China, son regiones que ya tienen estipuladas políticas para el uso y compra de hidrógeno de bajas emisiones.

Sin embargo, dado que la molécula de hidrógeno es idéntica sin importar la ruta que se usa para su producción dio pie a que se generara una nomenclatura por “colores” como hidrógeno verde, azul, gris, amarillo, blanco, entre otros.[3]Esta nomenclatura no permite documentar y diferenciar la ruta de obtención, por lo cual se hace necesario la implementación de un esquema de certificación, que además de brindarle a los compradores la confianza de que la energía usada para la producción del hidrógeno es renovable y/o baja en emisiones de CO₂, permita empezar a establecer una estructura de precios basados en los requerimientos del certificado emitido.

Con este proyecto se pretende revisar los mecanismos de certificación de origen de H₂ existentes más relevantes del mercado global, con el fin de realizar una comparación que permita determinar cuál o cuáles serían los mecanismos cuya adopción sea la más favorable para los actores públicos y privados del país y se integre a la hoja de ruta de hidrógeno en Colombia.

ABSTRACT

The policies of global energy transition have driven exponential growth in interest in the development of hydrogen applications in recent years. The goal is to identify an energy vector that aids in the reduction of greenhouse gas emissions and serves as an alternative to replace traditional fuels and necessary inputs in various industrial processes [1].

The hydrogen roadmap published by the National Government reaffirms the interest and necessary guidelines for the production of green and low-emission hydrogen. It positions Colombia as one of the main producers of this energy vector in the region, going so far as to consider possible future exports. The demand from regions such as Korea, Japan, the United States, India, and the European Union is projected to reach 99 Mt by 2050.[2]. The European Union, Japan, South Korea, and China already have established policies for the use and purchase of low-emission hydrogen.

However, since the hydrogen molecule is identical regardless of the production route used, it led to the creation of a "color" nomenclature such as green hydrogen, blue hydrogen, grey hydrogen, yellow hydrogen, white hydrogen, among others.[3] This nomenclature does not allow for documenting and differentiating the production route, which is why the implementation of a certification scheme becomes necessary. In addition to providing buyers with confidence that the energy used for hydrogen production is renewable and/or low in CO₂ emissions, this certification scheme should enable the establishment of price structures based on the requirements of the issued certificate.

This project aims to review the most relevant existing certification mechanisms for the origin of H₂ in the global market. The goal is to make a comparison that determines which mechanism or mechanisms would be most favorable for public and private actors in the country and can be integrated into the hydrogen roadmap in Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo 1 INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo 2 OBJETIVOS.....	5
2.1. Objetivo general	5
2.2. Objetivos específicos.....	5
Capítulo 3 PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	6
Capítulo 4 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	9
4.1. Clases de hidrógeno	9
4.2. Generalidades esquemas de certificación.....	11
4.3. Principales esquemas de certificación.....	15
4.3.1. CertifHy[20]	15
4.3.2 TÜV SÜD.....	20
4.3.3. Standard and Evaluation of Low-carbon Hydrogen, Clean Hydrogen and Renewable Hydrogen. China. [25].....	22
4.3.4. Green Hydrogen Standard de Green Hydrogen Organisation.[26]	25
4.3.5. CertHiLAC	28
Capítulo 5 METODOLOGÍA.....	30
Capítulo 6 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32
6.1. Índice huella de CO ₂	33
6.2. Límites de contabilidad de emisiones de CO ₂	35
6.3. Tecnologías de producción.....	36
6.4. Fuentes de electricidad	39
6.5. Adicionalidad	42
6.7. Cadena de custodia.....	43
6.8. Recomendación de adopción para Colombia	44
Capítulo 7 CONCLUSIONES.....	48
REFERENCIAS	50

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Mecanismos de certificación H ₂	2
Tabla 2. Matriz comparativa Mecanismos de Certificación de Hidrógeno.....	32
Tabla 3 Matriz de ponderación índice de CO ₂	34
Tabla 4. Matriz ponderación límites de contabilidad de emisiones	36
Tabla 5. Matriz de ponderación tecnología de producción	38
Tabla 6 Potencial máximo de captura de CO ₂ en Colombia	39
Tabla 7 Matriz de comparación fuentes de electricidad.....	40
Tabla 8. Matriz de ponderación Adicionalidad	43
Tabla 9 Matriz de ponderación Cadena de Custodia.....	44
Tabla 10. Resultados de análisis de mecanismos	44

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Marco legal y regulatorio del hidrógeno en Colombia	4
Figura 2 Cadena de valor del hidrógeno	10
Figura 3 Principales componentes de un sistema de certificación de hidrógeno.	11
Figura 4 Clasificación de los límites de contabilidad de emisiones de GEI	12
Figura 5 Diagrama esquema de identidad preservada.....	13
Figura 6 Diagrama esquema de segregación.....	13
Figura 7 Diagrama esquema de balance de masa.....	14
Figura 8 Diagrama esquema de Book And Claim.....	15
Figura 9 Esquema de certificación CertifHy	18
Figura 10 Esquema de Certificación TÜV SÜV	21
Figura 11 Comparación de límites de los esquemas CertifHy y Standard in China	24
Figura 12 Esquema de certificación China	24
Figura 13 Atributos de CertiHlac	29
Figura 14 Distribución de la producción de H ₂ en Colombia.....	37
Figura 15 Matriz de generación de electricidad	40
Figura 16 Demanda local prevista de hidrógeno renovable y bajo en carbono para 2030 de acuerdo con la estrategia nacional de hidrógeno existente de cada país.	45
Figura 17 Propuesta de límites de emisiones de CO ₂ para el mercado colombiano	46

ABREVIATURAS

CO ₂	Dióxido de Carbono
GEI	Gases de efecto Invernadero
GPC	Giga Pies Cúbicos
H ₂	Hidrógeno
IDB	Inter-American Development Bank
Mbl	Millones de Barriles
Mt	Megatoneladas
FNCER	Fuentes No Convencionales de Energía Renovable
CCUS	captura, uso y almacenamiento de carbono

GLOSARIO

Hidrógeno Verde	Se produce a partir de energías renovables, como la energía solar, eólica, entre otras. La producción de este hidrógeno se realiza a través del proceso de electrolisis del agua, en el cual se busca descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno.
Hidrógeno Gris	Producido a partir de combustibles fósiles mediante el proceso de reformado de vapor de metano, que es cuando el gas natural se descompone a altas temperaturas en hidrógeno y monóxido de carbono. Este es el método más utilizado mundialmente por la producción industrial de H ₂ . El metano reacciona con vapor de agua para dar monóxido de carbono e hidrógeno sobre la superficie de un catalizador, además de dióxido de carbono.[4]
Hidrógeno Azul	Se denomina hidrógeno azul al producido a partir de fuentes fósiles que incorporan captura y almacenamiento de emisiones de CO ₂ . La Ley de Transición Energética define como hidrógeno azul al que se produce a partir de combustibles fósiles, especialmente por la descomposición del metano (CH ₄) y que cuenta con un sistema de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCS), como parte de su proceso de producción.[2]
Greenwashing	Hace referencia a cuando las marcas, organizaciones o gobiernos promueven una imagen de conciencia ecológica sin tomar medidas significativas para respaldarla. Dicho más simple, y en el caso de las empresas, cuando engañan a los consumidores afirmando que sus productos son más sostenibles de lo que son en realidad.
Certificado de origen de hidrógeno	Es un documento que confirma el proceso de producción del vector.

Balance de masa	Este metodo permite la mezcla de hidrógeno de bajas emisiones certificado con uno no certificado garantizando que al final de la cadena, las cantidades sean igual que las iniciales
Book And Claim	Este esquema permite separar el hidrógeno de su certificado, logrando asignar los atributos relacionados a una unidad de producto a cualquier otra unidad que puede no estar en la misma cercanía geográfica. Este mecanismo es uno de los más convenientes ya que permite a compradores recibir sus productos de proveedores más cercanos y a su vez, asegurar la certificación por medio de la compra directa de dicho certificado. Adicional a lo anterior, este método no exige el rastreo ni la separación física del hidrógeno a lo largo de toda la cadena de custodia, lo cual, ahorra en esfuerzos y costos de la comercialización del producto
Adicionalidad	Se refiere a garantizar que la electricidad renovable usada para producir hidrógeno provenga de una instalación de energía nueva.
Garantía de Origen (GO)	Es un documento comercializable que etiqueta el origen de un producto y proporciona información a los clientes sobre la fuente origen de sus productos. Las GO funcionan como un sistema de seguimiento que garantiza la calidad de un producto como por ejemplo el hidrógeno o la electricidad. Un esquema GO desacopla el atributo “verde” del flujo físico del producto. [5]

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

La preocupación por el cambio climático durante los últimos años ha resultado en compromisos gubernamentales [6] para trabajar conjuntamente en diferentes soluciones y políticas que se alineen con la necesidad de encontrar alternativas para garantizar el desarrollo sostenible del sector energético. Acuerdos como el de París firmado el 15 de diciembre de 2015, en donde 196 naciones se reunieron para frenar el calentamiento global y reducir los gases de efecto invernadero (GEI) ratifica dicho compromiso [7].

A raíz de estos compromisos se hace necesario buscar alternativas tecnológicas para que se diversifique la matriz energética y descarbonizar algunos sectores de cada uno de los países. Estas alternativas comienzan por buscar eficiencia a través de prácticas en las cuales los usuarios asumen la responsabilidad de tomar conciencia, siempre priorizando el máximo aprovechamiento de los recursos energéticos y considerando el uso de equipos altamente eficientes como una medida inicial. A lo anterior se suma el desarrollo de energías no convencionales renovables como solar, eólica, biomasa, etc., que permitirán la generación de electricidad de bajas emisiones produciendo una oferta suficiente para electrificar diferentes procesos y actividades industriales, sustituyendo el uso de combustibles fósiles. Sin embargo, a pesar de que con las medidas mencionadas se aporta en la disminución de emisiones, hay aplicaciones en las que la electrificación no puede considerarse como una solución efectiva en términos técnicos o económicos, como, por ejemplo:

- Movilidad: Buses de pasajeros, trenes, aviones, camiones de carga y barcos.
- Insumos industriales: Producción de amoníaco, refinerías, metalurgia, vidrio, acero, químicos, grasas y aceites.

Para las aplicaciones mencionadas anteriormente es necesario identificar una alternativa que garantice la reducción en las emisiones de GEI y que permitan alcanzar los compromisos ambientales sin poner en riesgo el objetivo de la industria. En este contexto, el hidrógeno cobra

valor como uno de los insumos que pueden brindar una solución en dichas aplicaciones gracias a sus características fisicoquímicas.

Las moléculas de hidrógeno son idénticas, incoloras e inodoras sin importar cuál sea su método de producción [8], pero sí existe una gran diferencia en los costos y las emisiones de GEI asociadas a estos. Lo anterior hace imperativo contar con esquemas de certificación de origen de hidrógeno que permitan rastrear y certificar dónde y cómo se genera este vector y cuáles son sus atributos ambientales asociados.

Los esquemas de certificación de origen de son un conjunto de medidas y procedimientos que se utilizan como herramienta de reporte y verificación de los atributos generados en la producción de hidrógeno [5]. Los atributos son las características del hidrógeno que se desean certificar, por ejemplo:

- El origen, que se refiere a la fuente que usa para producir H₂.
- La huella de carbono, es decir cuáles son las emisiones asociadas a la producción del vector.
- Dispositivo de producción (electrolizador, reformado de vapor, entre otros).

La certificación de H₂ permite que los consumidores y usuarios de este vector obtengan información sobre su procedencia y se sientan seguros de que este insumo haya sido producido bajo parámetros y procesos específicos.

A nivel mundial se han desarrollado varios mecanismos de certificación de origen de hidrógeno como:

Tabla 1. Mecanismos de certificación H₂

Mecanismo	Región
CertifHy	Unión Europea
TÜV SUD	Unión Europea / Alemania
Aichi Prefectura	Japón
China Hydrogen Alliance	China

Mecanismo	Región
Green Hydrogen Organisation	Australia
Certification Scheme	Australia

Fuente: [9] .

Todos estos mecanismos, aunque tienen el mismo objetivo, han sido desarrollados por diferentes organizaciones lo cual imposibilita que los países productores y futuros compradores de H₂ de bajas emisiones, puedan empezar a estandarizar requerimientos y sea mucho más fácil la comercialización en un futuro próximo. Lo anterior, en gran parte se debe a que cada región del mundo tiene intereses y regulaciones diferentes de transición energética.

A pesar de que los mecanismos de certificación más importantes han sido desarrollados de manera independiente por entidades privadas, el 8 de noviembre de 2023 durante la semana de la energía en Montevideo Uruguay, los ministerios y secretarías de Energía de Argentina, Bolivia, Chile, Colombia, Ecuador, El Salvador, Guatemala, Honduras, Panamá, Paraguay, República Dominicana, Trinidad y Tobago y Uruguay, con el acompañamiento del Banco Interamericano de Desarrollo (“BID”) y la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) suscribieron la “Declaración conjunta para la implementación de un sistema de certificación de hidrógeno limpio y/o de bajas emisiones y sus derivados para Latinoamérica y el Caribe”, denominado CertHiLAC. Tener un mecanismo gubernamental que involucre a varios países de la región y que permita estandarizar la comercialización de hidrógeno traerá incontables beneficios y dará la aceleración necesaria a los países caribes y latinoamericanos para atender mercados internos y externos como los de Europa y Asia [10].

La ruta de hidrógeno de Colombia refleja las intenciones gubernamentales de establecer al país como un exportador de este vector energético en el mercado global del H₂, es fundamental que el país adquiera conocimiento sobre los diversos certificados de origen disponibles, comprendiendo sus ventajas, desventajas y posibles escenarios de adopción. Esto permitirá comenzar a identificar el esquema de certificación más adecuado para cumplir con los objetivos nacionales y sentar las

bases para establecer el mecanismo que será implementado en la futura comercialización nacional y mundial de H₂. [2]

A continuación, se presenta el trabajo que ha hecho el gobierno nacional para el desarrollo de las energías renovables y del hidrógeno, como se ilustra en la Figura 1:



Figura 1 Marco legal y regulatorio del hidrógeno en Colombia

Fuente:[11]

El alcance de este proyecto busca revisar los mecanismos de certificación de hidrógeno existentes en la actualidad y compararlos de tal forma que se pueda determinar que metodología sería la más recomendada para el país y su objetivo de ser uno de los comercializadores de hidrógeno de bajas emisiones más importantes de la región.

Capítulo 2

OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Revisar los mecanismos de certificación de origen de hidrógeno existentes más relevantes en la actualidad, con el fin de realizar un análisis de ventajas, desventajas y/o barreras para una recomendación de adopción en Colombia.

2.2. Objetivos específicos

Objetivo 1. Identificar los mecanismos de certificación de origen de hidrógeno existentes más relevantes a nivel mundial.

Objetivo 2. Realizar una comparación de los diferentes mecanismos identificando las definiciones de hidrógeno de bajas emisiones, funcionamiento del esquema de certificación, responsables ejecutantes, organismos emisores y etiquetas.

Objetivo 3. Realizar recomendación para la posible adopción de una metodología de certificación de origen de hidrógeno de bajas emisiones en Colombia.

Capítulo 3

PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Como se expuso en el Capítulo 1, el hidrógeno puede producirse por varias rutas, las cuales tienen diferentes costos asociados, tecnologías, beneficios y niveles de emisiones de dióxido de carbono asociadas a su producción. Con el fin de que se cumplan las metas de mitigación nacionales, es necesario demostrar que las emisiones generadas durante estos procesos son lo suficientemente bajas.[12] Adicionalmente, con el fin de competir en la exportación de hidrógeno de bajas emisiones, se hace necesario contar con un mecanismo de certificación de origen que permita desarrollar la cadena de valor de dicho vector energético en el mercado y que le demuestre a los países importadores que el producto que están adquiriendo, a pesar de ser más costoso, se alinea a los requerimientos establecidos en sus políticas energéticas.

El principal problema al cual se encuentra enfrentado la industria de hidrógeno en Colombia, es que a pesar de que en la hoja de ruta se tienen claras las metas de producción para alinearse a los objetivos de descarbonización para el año 2050 y en donde se estima un potencial de exportación hacia China, Japón, Corea y Estados Unidos [2] , no se ha planteado hasta el momento la adaptación y/o creación de ningún mecanismo de certificación de origen que permita garantizar la trazabilidad y las emisiones asociadas a la producción de dicho vector energético. A lo anterior, se suma que, a nivel global, existen ya varios mecanismos de certificación de hidrógeno de bajas emisiones en el mercado, y Colombia debería tomar la decisión de implementar alguno de estos mecanismos según lo que más le convenga al país, priorizando ya sea la facilidad de implementación o las condiciones ya establecidas por los países importadores objetivos.

Hasta el momento, Colombia tiene definida una serie de normativas y unos objetivos trazados por la ruta de hidrógeno, las cuales han impulsado el desarrollo de diferentes pilotos que buscan trazar los inicios de la producción masificada. La ley 2099 del 2021 integra los conceptos de H₂ verde e H₂ azul en el marco normativo de las fuentes no convencionales de energía (FNCER) otorgando todos los beneficios de la Ley 1715 de 2014 a los proyectos de generación de hidrógeno, sin embargo, aún existen diferentes desafíos y barreras legales para lograr dicha masificación.

Según Inés Vesga [13] una de las grandes barreras se debe a la dificultad y obtención oportuna de licencias y permisos ambientales asociados a proyectos de generación de energía, sin que los proyectos de generación de FNCER encuentren viabilidad, tampoco será viable un proyecto de H₂. Asimismo, otro gran vacío en la regulación es la falta de definición de límites de emisiones, lo cual veremos más adelante en el desarrollo del documento. Finalmente, en cuanto a transporte de este vector, aún existen vacíos regulatorios y la forma de llevarse a cabo su traslado.

Pero no todo son limitantes, según Mónica Gasca [14] Colombia es uno de los países mejor posicionados para el mercado para la producción de hidrógeno verde competitivo, información entregada por la Agencia de Energía Renovables, Colombia es el cuarto país que puede producir hidrógeno más barato gracias a la disponibilidad de recurso, adicional, el país ya tiene 28 proyectos en curso avalados por la Asociación de Hidrógeno.

Sin importar cual sea el siguiente paso en el mercado del hidrógeno de bajas emisiones en Colombia, es necesario poner a disposición de los proyectos y de los productores un mecanismo de esquemas de certificación que permita realizar la trazabilidad de las emisiones asociadas a este producto y que genere una verdadera ventaja competitiva en términos regulatorios sobre otros países con alta capacidad de recursos renovables y que también ven al H₂ de bajas emisiones como una oportunidad de generar ingresos de manera sostenible. Para cumplir con lo anterior, se deben conocer las ventajas y desventajas de los mecanismos existentes y estudiar la facilidad de adopción de los requisitos de dichos mecanismos en la industria y gobernabilidad colombiana. Este trabajo compilará la información esencial de cada mecanismo y permitirá al lector conocer que mecanismo se podría adaptar a los intereses y realidades del país.

En resumen, existen tres propósitos de una certificación de hidrógeno en Colombia [15]:

- Para exportar hidrógeno a consumidores de otros países
- Para comercializar hidrógeno en el mercado nacional: Esquema voluntario con propósito de divulgación al consumidor.
- Para comercializar hidrógeno en el mercado nacional: Esquema para verificación de cumplimiento con regulaciones.

Según el Departamento de Negocios, Energía y Estrategia Industrial del gobierno de Reino Unido [16] un esquema de certificación de hidrógeno podría generar innumerables beneficios para la cadena de valor del vector, incluyendo a productores, compradores y a la sociedad donde se desarrollen los proyectos respaldando la descarbonización de la economía. Adicional, los certificados ayudarían a los participantes a acceder a nuevos mercados e incluso a ser beneficiarios de programas de subsidios en los cuales sea necesario tener una evidencia de la generación limpia asociada al H₂. Si bien ya existen mercados para el hidrógeno, las preocupaciones sobre el greenwashing¹ pueden socavar la confianza de los consumidores e inversores, ya que las empresas pueden ingresar a estos mercados sin que sus productos cuenten con una certificación. Los certificados, especialmente cuando cuentan con el respaldo del gobierno y una cadena de custodia sólida, son una forma efectiva demostrar que la disminución de emisiones que las empresas afirman haber logrado realmente han ocurrido.

¹ Greenwashing: Hace referencia a cuando las marcas, organizaciones o gobiernos promueven una imagen de conciencia ecológica sin tomar medidas significativas para respaldarla. Dicho más simple, y en el caso de las empresas, cuando engañan a los consumidores afirmando que sus productos son más sostenibles de lo que son en realidad. [17]

Capítulo 4

MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

Más allá de ser el elemento químico más ligero que existe, el átomo de hidrógeno está formado por un protón y un electrón, siendo estable en forma de molécula diatómica (H_2). En condiciones normales se encuentra en estado gaseoso y es insípido, incoloro e inodoro. En la Tierra es muy abundante y constituye aproximadamente el 75 % de la materia del universo; sin embargo, se encuentra principalmente combinado con otros elementos como el oxígeno formando moléculas de agua o como el carbono formando compuestos orgánicos. Por tanto, no es un elemento que pueda tomarse directamente de la naturaleza para convertirlo en un combustible, sino que es un vector energético (como la electricidad) y por ello se tiene que “fabricar.” [8]

4.1. Clases de hidrógeno

En cuanto a su producción existen varias rutas que se distinguen dependiendo de las materias primas usadas, las fuentes de energía utilizadas y las tecnologías empleadas. A raíz de esta variedad de rutas, se ha creado un sistema de clasificación por colores que permite a los usuarios y al público general diferenciar los tipos de hidrógeno. Los identificados en la ruta de hidrógeno de Colombia son:

- **Hidrógeno Gris:** Producido a partir de combustibles fósiles mediante el proceso de reformado de vapor de metano, que es cuando el gas natural se descompone a altas temperaturas en hidrógeno y monóxido de carbono. Este es el método más utilizado mundialmente por la producción industrial de H_2 . El metano reacciona con vapor de agua para dar monóxido de carbono e hidrógeno sobre la superficie de un catalizador, además de dióxido de carbono.[4]
- **Hidrógeno Azul:** Se denomina hidrógeno azul al producido a partir de fuentes fósiles que incorporan captura y almacenamiento de emisiones de CO_2 . La Ley de Transición Energética define como hidrógeno azul al que se produce a partir de combustibles fósiles,

especialmente por la descomposición del metano (CH_4) y que cuenta con un sistema de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCS), como parte de su proceso de producción.[2]

- **Hidrógeno Verde:** Se produce a partir de energías renovables, como la energía solar, eólica, entre otras. La producción de este hidrógeno se realiza a través del proceso de electrolisis del agua, en el cual se busca descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno. Este proceso se realiza en tres etapas:
 - Se utiliza la energía renovable para generar electricidad, que se suministra a un electrolizador.
 - El electrolizador descompone el agua en hidrógeno y oxígeno.
 - El hidrógeno resultante se comprime y se almacena [18]

La siguiente figura muestra como se obtiene el hidrógeno a partir de los diferentes tipos de energía.

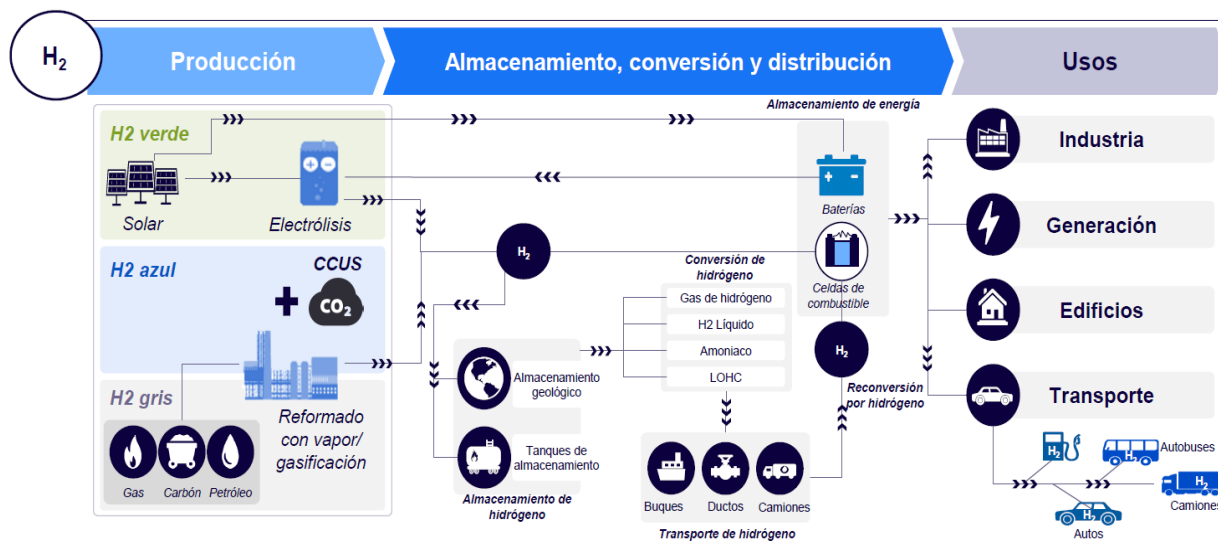


Figura 2 Cadena de valor del hidrógeno

Fuente: Conferencia de Rodolfo Guzmán [19]

4.2. Generalidades esquemas de certificación

Dadas las características fisicoquímicas del hidrógeno mencionadas y con el fin de poder determinar las emisiones de GEI asociadas a su método de producción, se hace necesario acudir a los esquemas de certificación de origen. Estos mecanismos son claves para crear beneficios en toda la cadena de suministro de la producción del hidrógeno, permitiendo a todos los participantes acceder a diferentes mercados, siempre y cuando se ajusten a la regulación y cumplan con los requerimientos que exige el mecanismo y sus atributos.



Figura 3 Principales componentes de un sistema de certificación de hidrógeno.

Fuente: [5]

Como se muestra en la Figura 3, los esquemas de certificación contienen un conjunto de procedimientos que se deben seguir con el fin de estandarizar y certificar el origen de sus atributos ambientales. Dentro de los atributos principales que se certifican se tienen:

- **Origen:** Insumo energético utilizado para producir el hidrógeno
- **Huella de carbono:** Cantidad de emisiones de GEI asociadas a la producción, por lo general kilogramos de CO₂ generados por un kilogramo de hidrógeno producido.
- **Tecnología de producción:** Método usado para la fabricación de hidrógeno. Por ejemplo, gasificación, reformado de vapor de metano, electrolizador, etc.

- **Renovabilidad de la energía:** Para el caso de la generación por electrolizador, es necesario conocer las condiciones en la que dicha energía es de fuente renovable o no, lo cual se puede verificar por medio de las siguientes variables:
 - Garantías de origen: Certificado de garantía de origen que demuestre que la electricidad usada proviene de una fuente renovable:
 - Adicionalidad: Garantizar que la energía usada para la producción proviene de una instalación de energía renovable nueva.
 - Correlación temporal: Cuando la electricidad utilizada para la fabricación del hidrógeno es consumida en el mismo marco temporal en el cual la electricidad de fuentes renovables es generada.
 - Correlación geográfica: Cuando la electricidad renovable usada para la producción del H₂ debe generarse a una distancia cercana a la planta de producción del hidrógeno.

Ahora bien, adicional a los atributos, los esquemas de certificación de origen deben definir la forma de rastreo de las emisiones y su cadena de custodia. Por ejemplo:

- **Límites de contabilidad de emisiones:** Es necesario definir desde y hasta qué punto el mecanismo de certificación va a contabilizar las emisiones, por lo general se pueden encontrar dos opciones, hasta el punto de producción o hasta el punto de uso como se observa en la Figura 4.

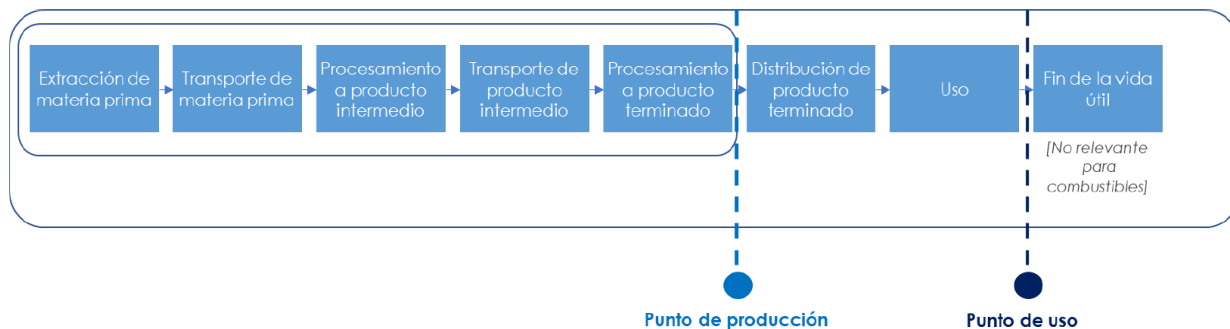


Figura 4 Clasificación de los límites de contabilidad de emisiones de GEI

Fuente: [5]

- **Cadena de custodia:** Proceso base para rastrear cada molécula de H₂ desde su producción hasta su uso final. Se encuentran 4 principales métodos que son:

- **Identidad preservada:** Los productos certificados se separan físicamente todo el tiempo de los no certificados a lo largo de toda la cadena de custodia del H₂. Ver Figura 5

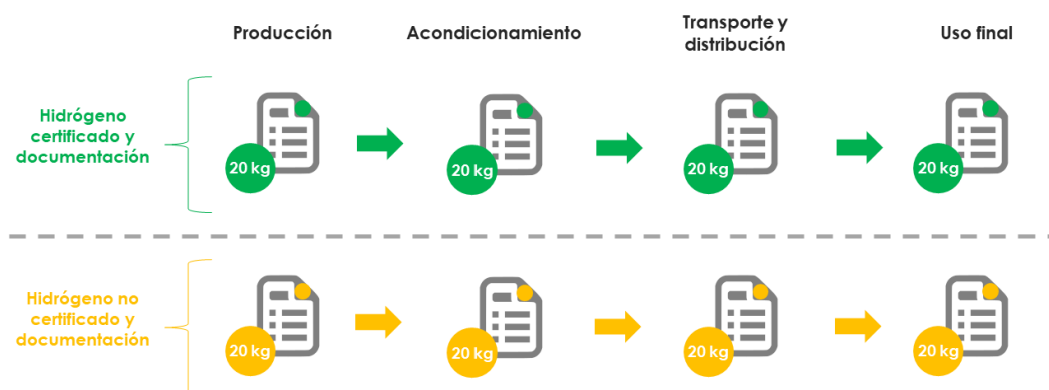


Figura 5 Diagrama esquema de identidad preservada

Fuente:[5]

- **Segregación:** Los productos certificados se separan físicamente, sin embargo, no permite diferenciar específicamente el origen de producción de la molécula de hidrógeno. En la Figura 6 se observa el funcionamiento de este esquema.

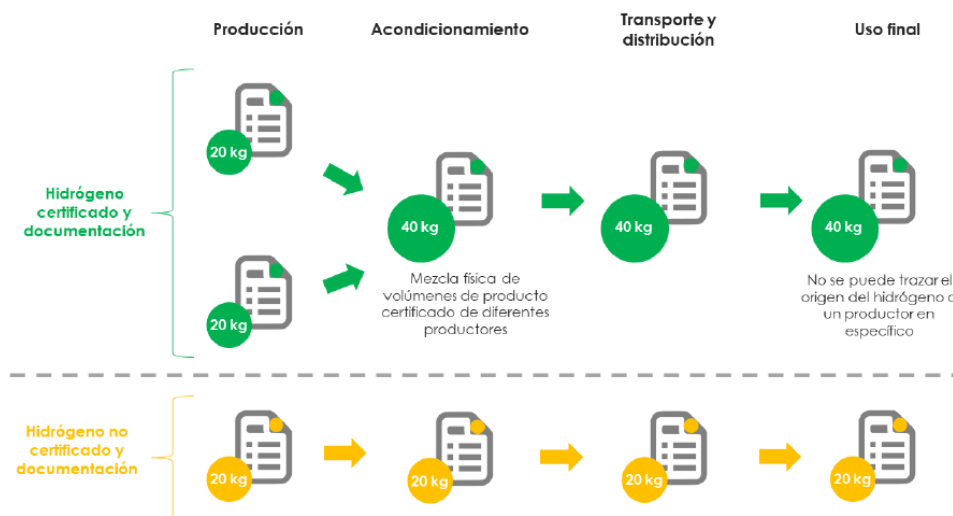


Figura 6 Diagrama esquema de segregación

Fuente:[5]

- Balance de masa: Este método permite la mezcla de hidrógeno de bajas emisiones certificado con uno no certificado garantizando que al final de la cadena, las cantidades sean igual que las iniciales. Ver Figura 7.

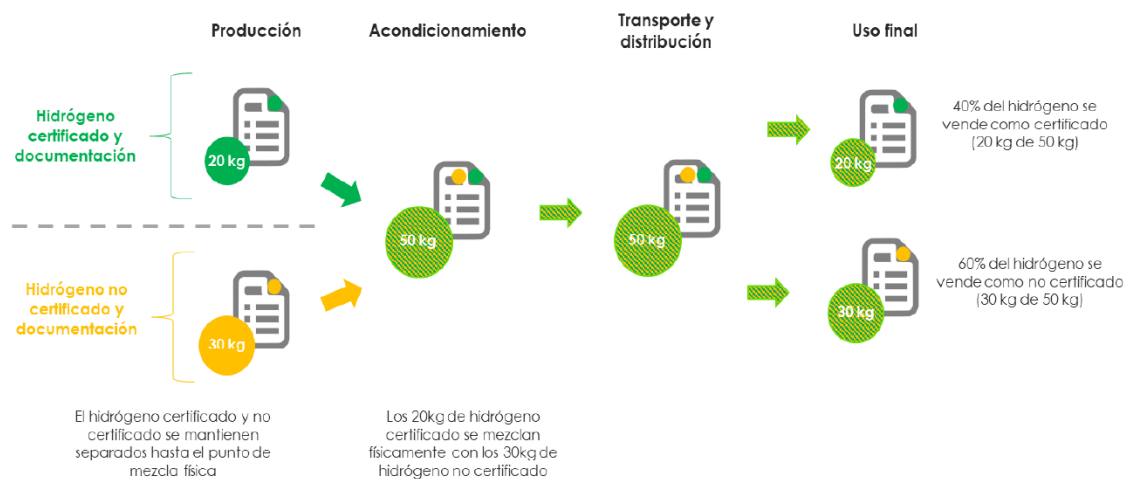


Figura 7 Diagrama esquema de balance de masa.

Fuente:[5]

- Book And Claim: Este esquema permite separar el hidrógeno de su certificado, logrando asignar los atributos relacionados a una unidad de producto a cualquier otra unidad que puede no estar en la misma cercanía geográfica. Este mecanismo es uno de los más convenientes ya que permite a compradores recibir sus productos de proveedores más cercanos y a su vez, asegurar la certificación por medio de la compra directa de dicho certificado. Adicional a lo anterior, este método no exige el rastreo ni la separación física del hidrógeno a lo largo de toda la cadena de custodia, lo cual, ahorra en esfuerzos y costos de la comercialización del producto. En la Figura 8 se describe de manera gráfica este atributo.

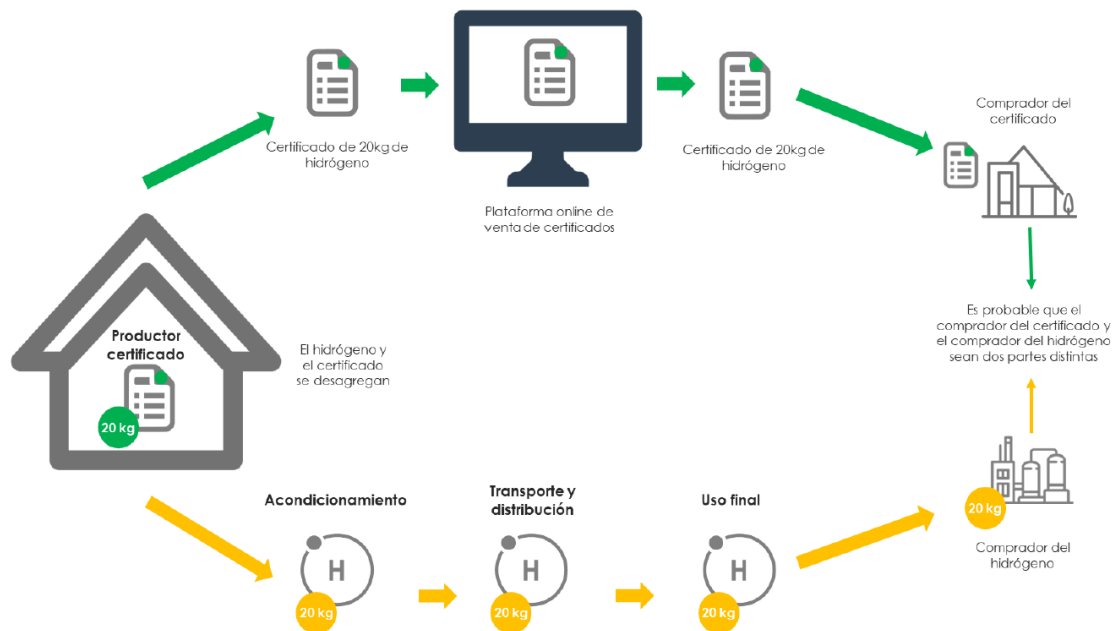


Figura 8 Diagrama esquema de Book And Claim

Fuente:[5]

4.3. Principales esquemas de certificación

Luego de conocer cuáles son las características generales de un esquema de certificación, y entendiendo que en la actualidad se está trabajando en diferentes esquemas privados que faciliten y aceleren la comercialización del Hidrógeno como un commodity a nivel global, se revisarán al detalle 4 de los principales mecanismos que ya se encuentran estructurados en la actualidad con el fin de conocer sus principales características y entender que tan lejos puede estar Colombia de implementarlo en su mercado.

4.3.1. CertifHy[20]

Es un esquema desarrollado por un consorcio liderado por HINICIO y compuesto por GREXEL, Ludwig-Bölkow-Systemtechnik (LBST), AIB (Association of Issuing Bodies), CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies Alternatives) y TÜV SÜD [21]. Ha desarrollado esquemas de certificación de hidrógeno de alta calidad en toda Europa, presentándose como un ente confiable para que los consumidores rastreen el origen y los atributos ambientales

del hidrógeno. En particular, el objetivo de CertifHy es facilitar la creación de un sistema de esquema de garantías de origen (GO) en toda la Unión Europea (UE). Por lo tanto, los certificados CertifHy como se le conoce al producto que emite la compañía, se almacenan y mantienen en una base de datos central europea única donde se administra el ciclo de vida de los certificados para cada titular de cuenta.

CertifHy es un certificado que garantiza el origen renovable del hidrógeno, proporciona a los productores, consumidores y usuarios finales que el H₂ adquirido cumple con los requisitos de sostenibilidad ambiental, este mecanismo es voluntario, pero se está convirtiendo es un requisito clave para el comercio de hidrógeno en Europa.

Un CertifHy GO es un documento electrónico que prueba que una determinada cantidad de hidrógeno es producida por un dispositivo de producción registrado con una calidad y un método de producción específicos. Los certificados CertifHy™ GO se mantienen en un Registro CertifHy, una base de datos central que administrará el ciclo de vida de CertifHy GO para cada titular de cuenta.

CertifHy considera los siguientes atributos:

- Fuente de energía renovable
- Proceso de producción sostenible
- Transparencia en la cadena de suministro
- Verificación independiente
- Etiquetado y certificación de producto

Lo anterior es importante ya que permite garantizar que el hidrógeno producido y utilizado proviene de fuentes renovables y cumple con ciertos estándares ambientales, esto implica que haya contribución a la transición de una economía baja en carbono, fomenta la inversión en energía renovables, genera confianza en el mercado y mejora la imagen de los productores de este vector energético el cual está promoviendo un futuro más sostenible y una economía más limpia y eficiente.

Este mecanismo brinda la siguiente información:

- Número de identificación único, fecha de emisión y cancelación.
- Información sobre la planta que produjo el hidrógeno.
- Tiempo de Producción.
- Fuente de energía y tecnología.
- Intensidad de gases de efecto invernadero, es decir, la cantidad CO₂ equivalente por unidad de energía del hidrógeno.

Este esquema de certificación tiene dos etiquetas que son:

- Hidrógeno verde: Procedentes de fuentes renovables (definidas en el artículo 2 de la Directiva de Energías Renovables II) y con un balance de gases de efecto invernadero por debajo de un umbral definido, que es mínimo 60% por debajo de la producción de hidrógeno mediante reformado con vapor de gas natural (proceso de referencia con una huella de GEI actual de 4.9 kg CO₂/kgH₂). Esta intensidad de GEI se reevaluará periódicamente, ya que los objetivos de porcentaje de reducción de emisiones aumentarán con el tiempo.

Producción de electricidad con energía eólica, solar o hidráulica. Esos procesos de producción tienen cero emisiones de GEI y, por lo tanto, cero intensidades de carbono según la convención europea.

Producción basada en biomasa, que podría venir con emisiones de GEI según lo definido por RED II.

- Hidrógeno bajo en carbón: De origen no renovable, energía nuclear o fósil que utiliza captura y almacenamiento de carbono (CCS) y potencialmente captura y utilización de carbono (CCU) que aún está en definición por la legislación europea la cual tiene un balance de gases de efecto invernadero por debajo de un umbral definido, que es mínimo 60% por debajo de la producción de hidrógeno mediante reformado con vapor de gas natural (proceso de referencia con una huella de GEI actual de 4.9 kg CO₂/kg H₂). Esta intensidad de GEI se reevaluará periódicamente, ya que los objetivos de porcentaje de reducción de emisiones aumentarán con el tiempo.

Energía nuclear o fósil utilizando CCS (captura y almacenamiento de carbono) y potencialmente CCU (captura y utilización de carbono) que aún no se ha definido en la legislación europea.

Para lograr adquirir alguna de las etiquetas o certificación de origen de hidrógeno anteriormente mencionadas y adicional cumplir con la norma ISO 14021, se debe llevar a cabo el siguiente paso a paso, ver Figura 9.

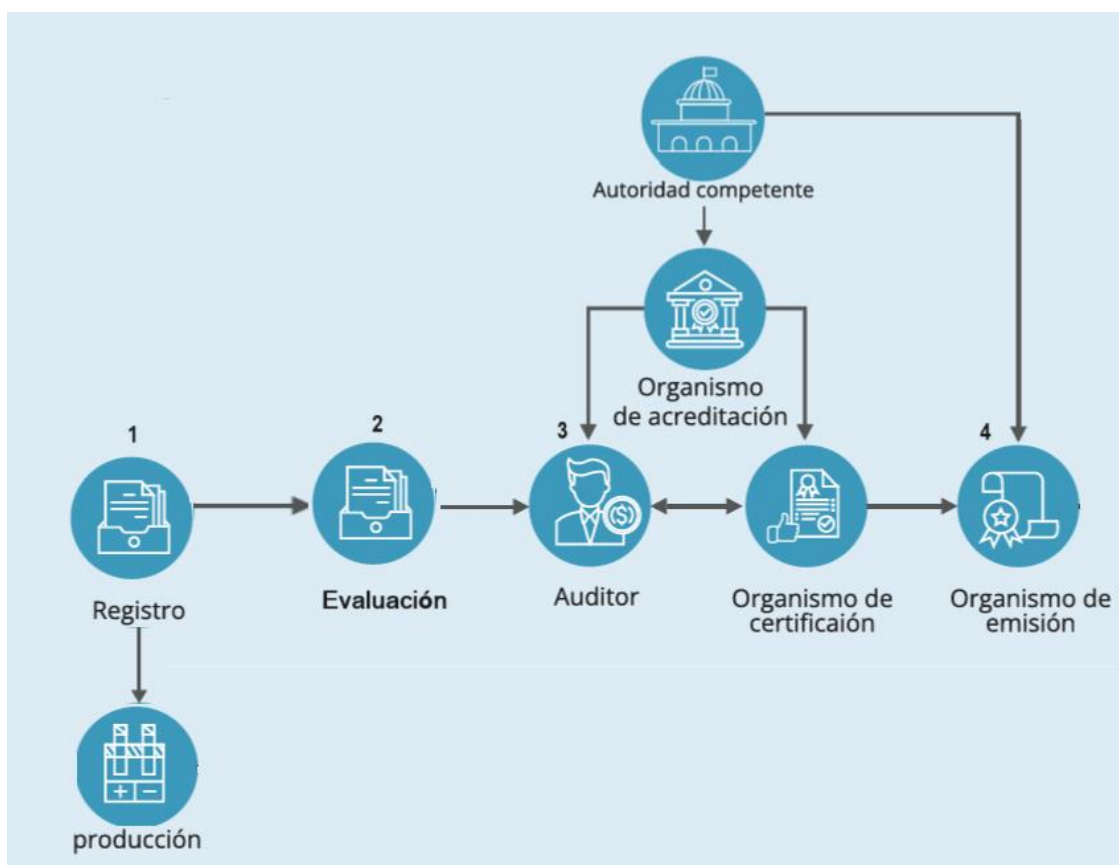


Figura 9. Esquema de certificación CertifHy

Fuente: [22] (adaptado)

- **Registro:** El productor de hidrógeno debe registrarse en la plataforma CertifHy y completar el formulario con la información requerida sobre su proceso de producción, incluyendo información sobre la empresa como el certificado de registro, sistema de gestión de calidad y los detalles de contacto.

El proceso de producción se deberá registrar por baches de producción y no deben tener más de 12 meses (a partir de la fecha de inicio del lote de producción).

Una vez aprobado el registro se proporciona un número de cuenta y detalles de inicio de sesión para acceder la CertifHy Registry.

- **Evaluación:** CertifHy llevará a cabo una evaluación de la información proporcionada por el productor de hidrógeno para verificar el cumplimiento de la certificación de hidrógeno, de los requisitos del esquema de certificación. Posterior al registro para el inicio del proceso la aplicación CertifHy llevará a cabo una evaluación que buscará asegurar que se cumplan los criterios básicos de elegibilidad. Algunos de los aspectos clave de esta evaluación incluyen: (i) Criterios de elegibilidad respecto a las fuentes de energía renovable utilizadas para la producción, (ii) Sostenibilidad y estándares de calidad relacionados con las instalaciones de producción donde se revisan temas como impacto ambiental, eficiencia en el uso de recursos, medidas de seguridad y adherencia a las regulaciones de la industria o a otros estándares reconocidos y (iii) Revisión de la documentación enviada para el proceso de certificación donde se debe remitir entre otros información técnica acerca del proceso de producción, fuentes de energía, niveles de emisiones y otras certificaciones o permisos otorgados. El propósito de esta evaluación es determinar el cumplimiento de requisitos previos al proceso de auditoría que se llevará a cabo en las instalaciones de producción donde se entrará a una evaluación más detallada sobre los puntos previamente evaluados.
- **Auditoría:** Un auditor independiente designado por CertifHy, el cual debe contar con una acreditación pertinente o formar parte de un organismo de certificación para llevar a cabo las siguientes actividades: Pre-auditoría la cual consiste en realizar una inspección inicial de las instalaciones de la planta de producción para verificar si cumple con las normas y reglamentos aplicables después de esto una auditoría principal en las instalaciones del productor de hidrógeno para evaluar el cumplimiento de los requisitos establecidos por CertifHy, realizar entrevistas con el personal clave, durante la auditoría, el auditor examina la producción de hidrógeno renovable, incluyendo la fuente de energía utilizada para producirlo, así como la medición y el registro de la energía y las emisiones de gases de

efecto invernadero y finalmente habrán auditorías de seguimiento que se realizan con el fin de verificar que se siguen cumpliendo con los requisitos establecidos por CertifHy.

- **Emisión del certificado:** Antes de la validación del primer lote de producción se emite solo el 90% de la certificación y el restante se reserva hasta finalizar el lote de producción. Si el productor de hidrógeno cumple con los requisitos del esquema de certificación, CertifHy emitirá un certificado de origen de hidrógeno que acredita la fuente de energía utilizada en el proceso de producción y la calidad del hidrógeno producido.
- **Renovación:** La certificación de origen de hidrógeno es válida por un período de doce meses, lo que significa que debe renovarse anualmente y este proceso debe iniciarse con al menos seis meses de anterioridad y está sujeta a la entrega de documentación actualizada sobre la producción de hidrógeno renovable y su calidad y los registros de las auditorías hechas anteriormente, una nueva evaluación y auditoría nuevamente.

4.3.2 TÜV SÜD

TÜV SÜD es una empresa con amplia experiencia en la certificación de hidrógeno (CMS 70) procedente de fuentes renovables, la última versión fue emitida el 11 de noviembre de 2021[23].

El proceso de certificación de hidrógeno verde requiere de una cantidad mínima que es de 1 MWh y consta de seis pasos [24], los cuales se observan en la Figura 10:



Figura 10 Esquema de Certificación TÜV SÜV

Fuente: Elaboración Propia

- Consulta
 - Cuestionario de consulta
 - Comprobación de requisitos
 - Propuesta
- Registro de auditoría
 - Formalización del pedido
 - Acuerdo con el programa de certificación
 - Planificación
 - Aprobación del organismo certificador
- Revisión de documentos
 - Evaluación de riesgos
 - Comprobación de documentos
 - Cálculo de GEI
 - Plan de audiencia
- Auditoría
 - Auditoría (incluye auditoría in situ)
 - Aclaración de cuestiones pendientes

- Informe de auditoría
- Certificación
 - Revisión técnica por el organismo certificador
 - Revisión formal por el organismo certificador
 - Decisión de certificación
 - Emisión del certificado
 - Registro del certificador por el programa certificador
- Inicio de la producción certificada por el titular del certificado
 - Gestión de calidad y documentación
 - Supervisión de producción, venta y emisiones de GEI

No existe restricciones sobre las tecnologías aplicables para la producción y los siguientes procedimientos son los comunes:

- Electrólisis
- Reformado de vapor de biometano sostenible
- Pirólisis / gasificación de biomasa sostenible o residuos biogénicos sostenibles
- Electrólisis de soluciones acuosas de cloruro de hidrógeno.

El uso del hidrógeno certificado puede utilizarse para aplicaciones de movilidad, para uso material (ejemplo, producción de acero, hidrogenación de aceites, producción de fertilizantes o almacenamiento para uso de energía).

El límite del sistema para el hidrógeno que debe certificarse es hasta la pureza alcanzada de al menos el 99,9 % y hasta la sobrepresión alcanzada de al menos 3,0 MP y deberá lograr una reducción de gases de efecto invernadero del 70 % en comparación con el valor de referencia de los combustibles fósiles de 80 g CO₂eq/MJ.

4.3.3. Standard and Evaluation of Low-carbon Hydrogen, Clean Hydrogen and Renewable Hydrogen. China. [25]

Esquema implementado el 29 de diciembre de 2020 por la China Hydrogen Alliance en donde se establecen las definiciones para certificar 3 diferentes tipos de hidrógeno: Bajo Carbono, Limpio y Renovable.

Los atributos este estándar, tienen similitudes evidentes con los atributos del mecanismo de CertifHy, especialmente limitado al punto de producción con el fin de reducir significativamente los costos administrativos. El estándar propone dos umbrales para medir las emisiones de GEI asociadas a la producción de hidrógeno.

- **Low Carbon Hydrogen:** Basado en las emisiones de producción de H₂ a partir de la gasificación del carbón actual y su reducción del 50% propuesto en el “Plan Nacional para abordar el cambio climático 2014-2020”. **14,51 Kg CO₂eq/KgH₂**
- **Clean Hydrogen:** Igual que el anterior, teniendo en cuenta las emisiones de GEI de la producción de hidrógeno a partir de la gasificación del carbón, pero esta vez con captura y almacenamiento de CO₂, sumándole un 65% de reducción de acuerdo con la meta establecida en la “Estrategia de Revolución en la Oferta y el consumo de Energía 2016-2030”, el umbral para este intervalo es de **4,9 Kg CO₂eq/KgH₂**. Adicionalmente esta categoría permite que la fuente de energía para la producción sea fuente fósil con captura de carbono o electricidad proveniente de la red interconectada de energía
- **Renewable Hydrogen:** Para este intervalo, además de estar abajo del umbral de **4,9 KgCO₂eq/KgH₂**, la fuente de energía debe ser únicamente fuentes renovables o reformado de vapor de biometano.

En la Figura 11 se comprara los límites de kgCO₂ eq/kgH₂ del esquema de certificación Certhify y es estudiado en este numeral.

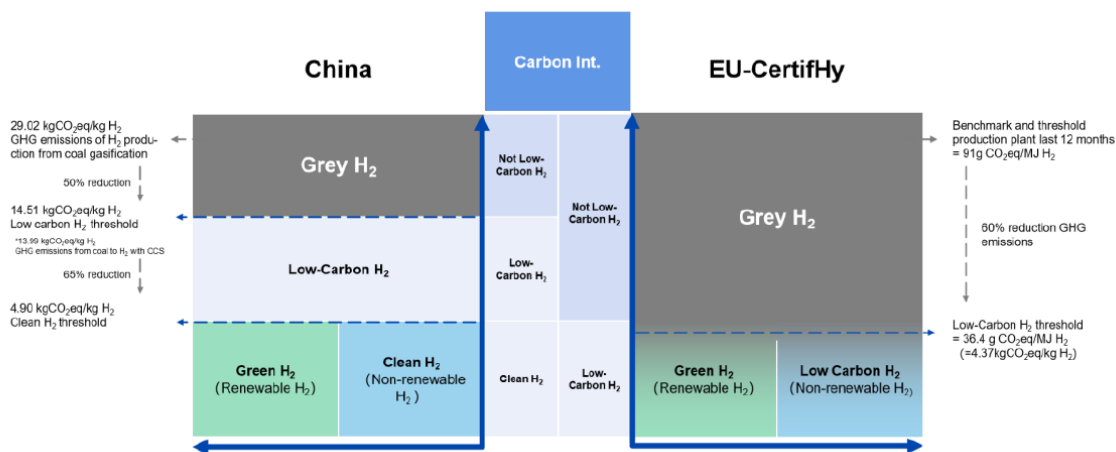


Figura 11 Comparación de límites de los esquemas CertifHy y Standard in China

Fuente:[25]

En el estándar, también se encuentra el proceso de evaluación de calificación mediante el cual el productor puede recibir la certificación del producto de acuerdo con los umbrales de emisiones de GEI. Estos pasos se encuentran en la Figura 12:



Figura 12. Esquema de certificación China

Fuente: Elaboración Propia

- **Solicitud de la certificación:** Solicitud formal al organismo regulador y preparación de los documentos relacionados, que incluyen el diagrama de flujo de producción de hidrógeno, equipos principales, informe de evaluación del ciclo de vida de la producción de hidrógeno, lista de materias primas para la producción y fuentes principales de energía.
- **Verificación de documentos y del lugar:** El organismo regulador revisa los documentos y visita las instalaciones del productor para corroborar si el productor cumple con los requisitos de la etiqueta solicitada.
- **Resultado de la evaluación:** Una vez culminado el paso anterior, el ente regulador emitirá una conclusión que será cargada en la plataforma de servicios para que el aspirante pueda acceder.
- **Emisión de etiqueta:** Una vez aprobada la solicitud, el productor recibe la certificación correspondiente y puede iniciar su comercialización. Es importante aclarar que este mecanismo permite comercializar el certificado y el hidrógeno juntos o de manera separa, por lo cual podría adaptarse a una cadena de custodia Book and Claim

4.3.4. Green Hydrogen Standard de Green Hydrogen Organisation.[26]

Green Hydrogen Organisation GH₂ es una organización sin fines de lucro que se dedica a establecer estándares y protocolos para la producción y uso de hidrógeno verde. Su objetivo es ayudar a acelerar la adopción del hidrógeno verde y fomentar su crecimiento sostenible en todo el mundo. Para lograr esto, GH₂ trabaja con una amplia gama de partes interesadas, incluidos gobiernos, empresas, instituciones académicas y organizaciones de la sociedad civil, para desarrollar políticas y prácticas que promuevan la producción y uso de hidrógeno verde en línea con los objetivos del acuerdo de París sobre el cambio climático. Además, G H₂ desarrolla herramientas y metodologías para evaluar el impacto ambiental de la producción y uso del hidrógeno verde y para medir y verificar su huella de carbono. La organización también colabora con otros grupos y organizaciones internacionales para promover el hidrógeno verde como una alternativa energética limpia y renovable.

La GH₂ tiene tres áreas de interés prioritario:

- **The Global Green Hydrogen Charter:** Esta iniciativa reúne a los gobiernos para compartir las buenas prácticas y políticas que han implementado para ayudar al crecimiento de la economía global del Hidrógeno.
- **The Green Hydrogen CEO Roundtable:** Iniciativa dedicada a la creación de mercados de hidrógeno, acreditación y estándares hidrógeno verde, reuniendo al sector privado en esfuerzos que permitan la inversión en toda la cadena de valor del H₂V.
- **The GH₂ Green Hydrogen Standard:** Lanzado en mayo del 2022, Standard (es un conjunto de criterios y principios desarrollado para promover y garantizar el desarrollo sostenible de proyectos de hidrógeno verde. El estándar establece requisitos en áreas como la gestión ambiental, social y de gobernanza, así como la transparencia y la responsabilidad en la toma de decisiones. Los proyectos que cumplen con el estándar son elegibles para obtener la licencia para usar la etiqueta "Hidrógeno Verde GH₂" y para emitir certificados de origen de garantía de hidrógeno verde GH₂, lo que proporciona una garantía a los compradores de que el hidrógeno se produce de manera sostenible.

Este mecanismo tiene como definición que el hidrógeno la siguiente: “Hidrógeno verde es el hidrógeno producido en un proceso de electrolisis del agua con 100% o cerca del 100% de energía renovable con emisiones de gases de efecto invernadero cercanas a 0. El estándar requiere que estas emisiones sean menores o iguales a 1Kg CO₂eq por Kg de H₂V en un periodo de 12 meses”

A continuación, se revisarán los 7 principios del Standard los cuales se deben garantizar a lo largo de todo el proceso de acreditación.

- **Soberanía y financiación:** GH₂ reconoce que el desarrollo de los recursos naturales y los mercados energéticos son competencia de los gobiernos soberanos y cualquier proyecto que los involucre debe ejecutarse en interés de los ciudadanos y del desarrollo nacional.

- **Proporcionalidad (materialidad):** GH₂ garantizará la proporcionalidad en el marco de acreditación y certificación. El proceso debe enfatizar los problemas e impactos más significativos del proyecto permitiendo desviaciones menores en los cumplimientos de los requisitos siempre y cuando se estén cumpliendo los objetivos más amplios de dicho requisito.
- **Armonización:** Para mejorar la calidad y eficiencia, GH₂ fomenta la alineación con las mejores prácticas internacionales y trabajará para garantizar la interoperabilidad de su trabajo con organizaciones que persiguen objetivos similares.
- **Consulta:** La acreditación y certificación de GH₂ requieren evidencia clara de consulta proactiva y amplia con las partes interesadas. Todas las partes interesadas tienen contribuciones importantes y relevantes que hacer, incluidos los gobiernos y sus agencias, empresas y sus proveedores, comunidades locales que puedan verse afectadas por el proyecto, organizaciones financieras, inversores y organizaciones no gubernamentales.
- **Transparencia:** GH₂ espera que los operadores de proyectos sean transparentes y asequibles con la información del proyecto que impacta a cualquiera de las partes interesadas. Los operadores de proyectos deben averiguar qué es de particular relevancia e interés para las partes interesadas específicas y buscar las mejores formas de compartir esa información. Esta información debe ser de libre acceso en línea y en otros formatos relevantes para la comunidad interesada. El acceso gratuito y la reutilización posterior de datos abiertos son de gran valor para la sociedad.
- **Verificación Independiente, inquietudes y apelaciones:** GH₂ depende de los operadores del proyecto para presentar un caso completo y convincente sobre cómo están cumpliendo con el Estándar, que estará sujeto a revisión independiente. GH₂ desarrollará un procedimiento de revisión y apelación, pero en primera instancia, los interesados con inquietudes sobre el cumplimiento del Estándar deben plantearlo al operador del proyecto













y/o a las autoridades nacionales correspondientes. Si esto no es apropiado o si la inquietud persiste, el interesado puede presentar una petición a GH₂ para que considere el asunto.

- **Desarrollo adicional del Estándar:** El Estándar busca equilibrar la previsibilidad y la flexibilidad en una industria nueva y en rápida expansión. Los proponentes del proyecto han destacado la necesidad de estándares claros y estables para informar la planificación a largo plazo. Los interesados también están de acuerdo en que GH₂ debe tener en cuenta las mejores prácticas emergentes, especialmente a medida que los proyectos se expanden desde pilotos hasta operaciones a gran escala. GH₂ revisará las lecciones aprendidas del proceso de acreditación y certificación en consulta con todos los interesados. Cualquier refinamiento o modificación subsiguiente del Estándar incluirá arreglos transitorios que permitirán a los operadores del proyecto realizar los ajustes necesarios dentro de un plazo razonable antes de entrar en vigor.

4.3.5. CertHiLAC

Nace como una iniciativa para mitigar esfuerzos redundantes de los países de América Latina y el Caribe en el desarrollo de los mecanismos de certificación de hidrógeno de bajas emisiones y sus derivados y así potenciar a toda la región como una de las principales para la exportación de dicho vector energético. Una de las necesidades más importantes que busca solucionar este sistema es la de unificar las definiciones de H₂ de los diferentes países firmantes, y que se alineen a lo propuesto por los certificados privados en donde se eliminan las etiquetas de colores y se clasifican por sus niveles de emisión de CO₂.

Al momento del desarrollo de este trabajo de grado, apenas se cuenta con una guía propuesta por el IDB en donde se proponen las consideraciones que tendría este mecanismo de certificación, no se tendrá en cuenta para el análisis y el objetivo de este documento investigativo, sin embargo, dado que Colombia es parte de los países que firmaron esta iniciativa, vale la pena referenciar cuales son los atributos ver Figura 13 propuestos para este mecanismo.

Atributtes	Justification	Certification category
<ul style="list-style-type: none">  Primary energy source and energy production plant information  H₂ production plant information  Intensity and scope of GHG measurement 	<p style="text-align: center;">Present in all certification systems worldwide</p>	
<ul style="list-style-type: none">  Positive social impact of the project on neighboring communities / native peoples  Sources and sustainable use of water  Measures to minimize the environmental impact of the project  Wastewater treatment (brine, when applicable)  Compliance with international labor standards  Location and use of sustainable and socially and environmentally harmonious land use (excluding land conflicts) 	<p style="text-align: center;">Highly relevant to the LAC Region</p>	<p style="text-align: center;">H₂ Certification LAC Region</p> 
<ul style="list-style-type: none">  H₂ production time versus energy* 	<p style="text-align: center;">Necessary to comply with time correlation criteria required by European regulations*.</p>	<p style="text-align: center;">H₂ Certification for EU markets</p> 

(*) Measurable geographic correlation and additionality criteria through the attribute "H₂ production plant information".

Figura 13 Atributos de CertiHlac

Fuente:[27]

Capítulo 5

METODOLOGÍA

El diseño metodológico de este trabajo se caracteriza por tratarse de una revisión de literatura que busca documentar los principales mecanismos de certificación de origen con el fin de identificar y analizar los atributos y las especificaciones necesarias para lograr la acreditación del hidrógeno y así, posteriormente hacer una caracterización de dichos mecanismos, extrayendo las variables que puedan ser comparables con Colombia de acuerdo con las definiciones y/o políticas planteadas desde la ruta de hidrógeno y el Gobierno Nacional.

Al contar con los datos comparables entre las certificaciones y Colombia se dará una valoración a cada una de estas por medio de una matriz de ponderación de 1 a 5, la cual mostrará cual es el mecanismo que más se adapta a las necesidades del país, y así luego brindar las recomendaciones apropiadas y necesarias para llevar a cabo la adopción del mecanismo en Colombia.

Para el desarrollo de la presente investigación se realizó la recolección de información de fuentes primarias y secundarias tomadas de las diferentes organizaciones que emiten los certificados de origen con el fin de entender la esencia de la metodología y poder unificar las características más importantes y comparables que pueden determinar una posible adaptación en el país.

Las características por comparar y ponderar en dicha matriz son:

- Definición de hidrógeno de bajas emisiones y atributos.
- Métodos de cadena de custodia
- Fecha de emisión y puesta en práctica del mecanismo
- Actores Relacionados

Siguiendo el planteamiento de la metodología, se asume que cada objetivo específico del proyecto fue tratado como una fase. Es así, como se presentan 3 fases, cada una con sus propias actividades.

FASE I: Investigación de los mecanismos de certificación de origen de hidrógeno existentes a nivel mundial y diagnóstico de Colombia

1. Revisión de los mecanismos existentes a nivel mundial
2. Análisis de cada uno de los mecanismos para clasificar cuales serían los ideales para una aplicación a nivel internacional.
3. Identificación de las variables de comparación
4. Realizar investigación de la regulación colombiana en cuanto a certificados de origen de H₂.

FASE II: Comparación de los diferentes mecanismos de certificación y su posible adaptación para el mercado colombiano

1. Diseñar matriz comparativa de las características identificadas en la fase anterior para cada uno de los mecanismos escogidos.
2. Realizar ponderación al comparar dichas características con el diagnóstico de la regulación colombiana.

FASE III: En esta última se darán las recomendaciones basadas en la ponderación de los diferentes mecanismos.

1. Establecer el mecanismo de certificación más recomendado para Colombia que le permita conseguir los objetivos trazados en la ruta de hidrógeno.

Capítulo 6

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La siguiente matriz muestra la comparación de los mecanismos de certificación más importantes a nivel internacional:

Tabla 2. Matriz comparativa Mecanismos de Certificación de Hidrógeno

Matriz de comparación de los mecanismo de certificación de hidrógeno globales								
Mecanismo	Sello	Huella de CO2 (kgCO2eq/kgH2)	Limites de contabilidad de emisiones	Tecnología de producción	Fuente electricidad	Adicionalidad	Cadena de custodia	Fecha de Emisión
CertifHy	Green H2	4,4	Producción			Si	Book & Claim	2019
	Low-Carbon H2	4,4	Producción			No	Book & Claim	2019
TÜV SÜD	CMS 70 Green H2	2,7	Hasta punto de uso			Si	Book & Claim Balance de Masa	2020
China Hydrogen Alliance	Renewable Hydrogen	4,9	Producción			No	Book & Claim	2020
	Clean Hydrogen	4,9	Producción			No	Book & Claim	2020
	Low Carbon Hydrogen	14,5	Producción		N/A	N/A	Book & Claim	2020
Green Hydrogen Standard	Low Carbon Hydrogen	1	Producción			Si	Not Specified	2023
CONVENIONES								
Electrólisis	Energías convencionales	Captura de CO2	Energía nuclear	Energía de la red	Biomasa	Energía eólica	Energía Solar	Energía Hidráulica

Fuente: Elaboración propia

Una de las razones por las cuales se escogieron los mecanismos evidenciados en la matriz anterior, fue por el desarrollo que han alcanzado desde su lanzamiento y gracias a que son los más usados en las regiones en las cuales Colombia tiene interés para la exportación de Hidrógeno [28]. Luego de escogidos los mecanismos, se realizó la elección de los atributos a ser comparados en la matriz, estos mecanismos fueron seleccionados basados en el documento de IRENA, en el cual se sintetizan las metas para crear un mercado global de hidrógeno [29].

Ahora bien, para entender la posición de Colombia se analizará cada uno de los atributos relacionados y se determinará que tan alejada o no se encuentra la regulación del país con los mecanismos por medio de una ponderación numérica de 0 a 5, donde:

0: No cumple con los requisitos del mecanismo

1: Cumple con los requisitos del mecanismo en un 20%

2: Cumple con los requisitos del mecanismo en un 40%

3: Cumple con los requisitos del mecanismo en un 60%

4: Cumple con los requisitos del mecanismo en un 80%

5: Cumple con los requisitos del mecanismo en un 100%

6.1. Índice huella de CO₂

A partir de la Ley 2099 de 2021 se tienen definidas las siguientes clases de hidrógeno en el país:

- Hidrógeno Verde: Es el hidrógeno producido a partir de Fuentes No Convencionales de energía Renovable, tales como la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, el calor geotérmico, la solar, los mareomotriz, entre otros y se considera FNCER. [30]
- Hidrógeno azul: Es el hidrógeno que se produce a partir de combustibles fósiles, especialmente por la descomposición del metano (CH₄) y que cuenta con un sistema de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS), como parte de su proceso de producción y se considera FNCE. [30]
- Hidrógeno gris: Producido a partir de combustibles fósiles, principalmente gas natural y carbón, sin subsecuente captura y almacenamiento de carbono.[2]

Lo anterior evidencia que Colombia aún no cuenta con un límite de emisiones definido respecto a la huella de CO₂ para cada uno de los tipos de hidrógeno que se tienen contemplados. Sin duda, esto es una de las mayores desventajas que tiene actualmente el país para alcanzar la intención de adaptarse o incluso generar un mecanismo de certificación de origen.

El decreto 1476 del 2022 en su artículo 2.2.7.1.5. estableció: “Certificación de Origen del Hidrógeno. El Ministerio de Minas y Energía y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible podrán adoptar un mecanismo público de certificación de origen del hidrógeno producido en el país, con el que se permita asegurar la unicidad y la trazabilidad de los insumos utilizados para la producción del hidrógeno y su intensidad de emisiones asociadas, así como cualquier otro atributo que se considere relevante monitorear”. [31] Lo anterior deja claro que el mecanismo depende de la trazabilidad de las emisiones asociadas a la producción del H₂, sin embargo no se encuentra realmente respaldado por las definiciones encontradas en la regulación emitida por el gobierno hasta hoy. Tener los límites definidos es el primer paso para empezar a revisar la forma de contar con un mecanismo sea gubernamental o privado. Por lo anterior, la calificación de Colombia en comparación con todos mecanismos analizados para el atributo de Índice de huella de CO₂ es 0.

Tabla 3 Matriz de ponderación índice de CO₂

Matriz de ponderación Índice huella de CO ₂ (kg CO ₂ eq/kgH ₂)							
	CertifHy		TÜV SÜD	China Hydrogen Alliance			Green Hydrogen Standard
	Green H ₂	Low-Carbon H ₂	CMS 70 Green H ₂	Renewable Hydrogen	Clean Hydrogen	Low Carbon Hydrogen	Low Carbon Hydrogen
	4.4	4.4	2.7	4.9	4.9	14.5	1
Colombia	0		0	0			0

Fuente: Elaboración propia

Ahora bien, es importante agregar al análisis de este atributo el cálculo de emisiones de CO₂eq que se producirían conectando un electrolizador al Sistema Interconectado Nacional (SIN). Según XM [32] el último factor de emisión asociado al SIN para el año 2022 es de 0.112378 ton CO₂e/MWh. Para encontrar la eficiencia del electrolizador de manera más exacta, se usaron las especificaciones del electrolizador PEM EL30N de H₂B2, el cual, según Antonio Vilela [33] es el

equipo escogido por Ecopetrol para los proyectos piloto de H₂ Verde en el país. En la página oficial de H₂B₂ encontramos que el consumo de energía para un electrolizador EL30N es de 5,2 kWh/Nm³ H₂ [34]; con estos datos se realizan los siguientes cálculos y conversiones para saber los Kg CO₂e/KgH₂

$$\frac{0.11 \text{ tonCO}_2\text{e}}{\text{MWh}} \times \frac{1 \text{ MWh}}{1000 \text{ kWh}} \times \frac{1000 \text{ kg}}{1 \text{ ton}} = 0.11 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{kWh}$$

$$\frac{5.2 \text{ kWh}}{\text{Nm}^3\text{H}_2} \times \frac{1 \text{ m}^3\text{H}_2}{0.089 \text{ KgH}_2} = 57.86 \text{ kWh}/\text{KgH}_2$$

$$0.11 \frac{\text{kgCO}_2\text{e}}{\text{kWh}} \times 57.86 \frac{\text{kWh}}{\text{KgH}_2} = 6.5 \text{ kgCO}_2\text{e}/\text{KgH}_2$$

De los cálculos anteriores se obtiene que, si se usara la energía del SIN para producir H₂ verde con un electrolizador EL30N, el índice de huella de carbono asociado es de 6.5 kg CO₂eq/kgH₂. A pesar de que no es un índice muy alto y hace honor al alto porcentaje de generación con energías renovables que tiene Colombia, no sería aceptado por todos los sellos de las certificaciones comparadas en el estudio a excepción del Low Carbon Hydrogen, que usa como referencia la producción eléctrica con carbón en el país asiático. Sin embargo, este número no deja de llamar la atención y da pie para pensar que, con la incorporación y entrada en marcha de los nuevos proyectos renovables, sería posible reducir el índice de emisiones asociadas al SIN y con esto, quizás se alcance a estar en el límite de 4.9 de los mecanismos de CertifHy y China Hydrogen Alliance.

6.2. Límites de contabilidad de emisiones de CO₂

Para el caso del atributo de límites de contabilidad de emisiones de CO₂, al igual que el atributo anterior, la regulación colombiana no tiene estipulada para la producción de hidrógeno verde o azul, desde que punto se deben contabilizar las emisiones. Por tal razón, la ponderación del país es 0 en todos los mecanismos.

Tabla 4. Matriz ponderación límites de contabilidad de emisiones

Matriz de ponderación Límites de contabilidad de emisiones							
	CertifHy		TÜV SÜD	China Hydrogen Alliance			Green Hydrogen Standard
	Green H ₂	Low-Carbon H ₂	CMS 70 Green H ₂	Renewable Hydrogen	Clean Hydrogen	Low Carbon Hydrogen	Low Carbon Hydrogen
	Producción	Producción	Hasta punto de uso	Producción	Producción	Producción	Producción
Colombia	0		0	0			0

Fuente: Elaboración Propia

Dado que el 87% de los sellos realizan el conteo de emisiones hasta la producción, es importante que el mecanismo que finalmente adopte el país o que diseñe de manera oficial, tenga el mismo límite, esto sin duda será un beneficio y facilitará el cumplimiento de los diferentes proyectos de generación. Hay que tener en cuenta, que además de las emisiones de CO₂eq asociadas a la producción sea utilizando un electrolizador o usando tecnologías de Captura de carbono, se deben calcular las emisiones asociadas al transporte y extracción de materias primas, por lo cual se hace necesario incluir otras Garantías de Origen (GO) incluso para la electricidad y registrar las emisiones asociadas al transporte de insumos. Es por lo anterior, se tiene que pensar en ubicar las plantas de generación de H₂ cerca de los proyectos de generación de energía renovable, lo cual simplificaría el conteo de las emisiones y facilitaría que los proyectos cumplan esta medición.

6.3. Tecnologías de producción

De acuerdo con el libro Recomendaciones para el desarrollo de la economía del hidrógeno en Colombia: Una estrategia nacional de hidrógeno, la producción actual de H₂ en el país se realiza a través de diferentes tecnologías como reformado de metano con vapor, reformado de metano con vapor más captura de carbono como se muestra en la Figura 14.

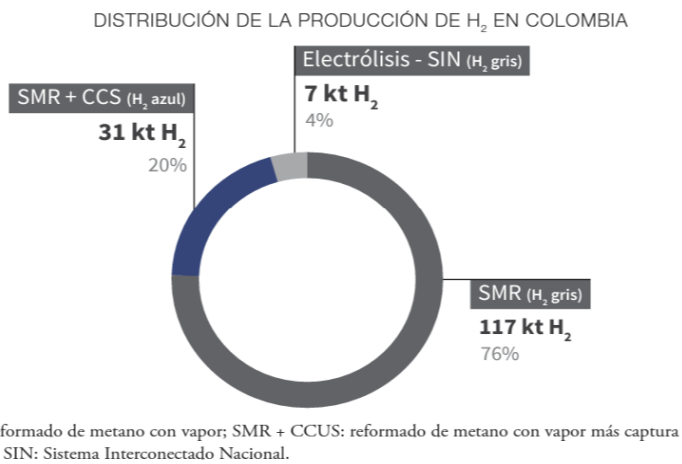









Figura 14 Distribución de la producción de H₂ en Colombia

Fuente: [35]

Adicional en el Plan Energético Nacional (PEN) contempla la instalación de electrolizadores de 500 Megavatios (MW) para el 2030 [36].

La calificación de Colombia en comparación con todos mecanismos analizados para el atributo de Tecnologías de producción se puede observar en la siguiente tabla y se concluye que el país está en capacidad de producir hidrógeno con cualquiera de las tecnologías utilizadas para su producción. Sin embargo, es de suma importancia para el país la posibilidad de generar H₂ de bajas emisiones utilizando el alto recurso fósil que se tiene, por lo cual, un mecanismo que exija solamente el uso de energías renovables tendrá menor calificación que los demás que permiten diversas tecnologías.

Tabla 5. Matriz de ponderación tecnología de producción

	Matriz de comparación Tecnología de producción						
	CertifHy		TÜV SÜD	China Hydrogen Alliance			Green Hydrogen Standard
	Green H ₂	Low-Carbon H ₂	CMS 70 Green H ₂	Renewable Hydrogen	Clean Hydrogen	Low Carbon Hydrogen	Low Carbon Hydrogen
							
Colombia	5		5	5			2

Fuente: Elaboración Propia

Cabe aclarar de la tabla anterior, que esta calificación se hace tomando como referencia las metas estipuladas por el PEN 2022-2052 en cuanto a captura de carbono se refiere, ya que, sin duda, esto es fundamental para el aprovechamiento de las reservas de carbón y combustibles fósiles para la generación de hidrógeno azul. Dicho documento estipula que uno de los factores tecnológicos más impactante en la evaluación de los escenarios y la consecución de los objetivos de descarbonización mundial es “Las perspectivas del hidrógeno y la captura, secuestro y utilización del carbono, la oportunidad de los fósiles en la transformación”. Acá la Unidad de planeación Minero-Energética (UPME) deja claro, que en Colombia ya se están identificando clústeres de captura de CO₂ asociados a industrias cercanas a refinerías, operaciones de extracción de gas, y plantas de producción de bioetanol y cemento. [36]

Es de suma importancia, empezar el potencial de almacenamiento geológico de CO₂, ya que según Escobar et. al [37] esto es un factor determinante al momento de planifica un sistema de captura y almacenamiento de carbono CCS. Colombia por medio de un estudio de Yanez et al [38] tiene identificado los 4 clústeres para captura y almacenamiento de CO₂ con sus respectivas capacidades de almacenamiento. Este estudio se enfoca en la utilización de este CO₂ para procesos de recobro mejorado (EOR), por lo cual no solo se estaría almacenando las emisiones post combustión, sino que adicional resultarían en una ganancia de producción de petróleo.

Tabla 6 Potencial máximo de captura de CO₂ en Colombia

	Ubicación	Potencial de almacenamiento (MtCO ₂)	Potencial de inyección (MtCO ₂ /año)	Industrias asociadas	Potencial recuperación de petróleo (MMbbl)
Clúster 1	Santanderes y Antioquia	107	4.33	Refinerías, cementeras y termoeléctricas	364
Clúster 2	Putumayo	14	0.22	Extracción de petróleo	36
Clúster 3	Atlántico, Magdalena y Córdoba	12	0.51	Refinerías, cementeras y termoeléctricas	41
Clúster 4	Huila y Valle del Cauca	21	0.87	Cemento, termoeléctricas y producción de biocombustibles	62
Total	Nacional	154	5.93	n/a	503

Fuente: [37]

Adicional a lo anterior, en temas regulatorios Colombia por medio del proyecto decreto “Por el cual se reglamentan parcialmente los artículos 22 y 57 de la Ley 2099 de 2021, el artículo 264 de la Ley 2294 de 2023 que adopta el Plan Nacional de Desarrollo 2022-2026 y se adiciona el Título VIII a la Parte 2 del Libro 2 del Decreto 1073 de 2015, en relación con la implementación de tecnologías de Captura, Utilización y Almacenamiento de carbono (CCUS)” [39] establece dentro de sus compromisos expedir los reglamentos técnicos que fijen los requisitos mínimos que deben cumplir los diseños, la instalación y los equipos que se utilicen para la Captura de Dióxido de Carbono en las actividades propias de cada sector, así como las entidades que se harán cargo del seguimiento de estos. Todo lo anterior, sumado a la ley 1715 del 2014 [40] en donde por medio de la definición de las Fuentes No Convencionales de Energía Renovable FNCER que contribuyeron a la agregación de diferentes proyectos solares y eólicos que ya representan en la matriz eléctrica colombiana 339MW [36].

6.4. Fuentes de electricidad

Colombia es un país que cuenta con una capacidad instalada de 18.626 MW de la cual el 70% proviene de energías renovables como se muestra en la electricidad y de acuerdo con el operador de mercado XM el país cuenta con las siguientes tecnologías de producción de energía eléctrica. [41]

- Hidráulica
- Biomasa
- Eólica
- Combustibles fósiles
- Solar

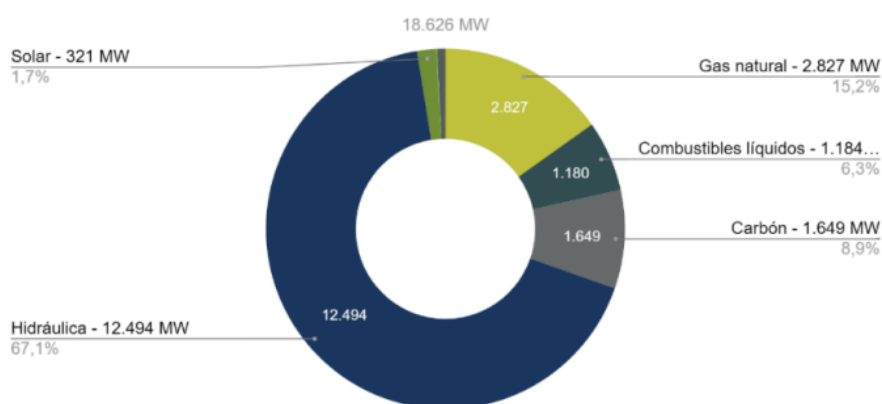








Figura 15 Matriz de generación de electricidad

Fuente: [36]

La calificación de Colombia en comparación con todos mecanismos analizados para el atributo de Fuente de Electricidad se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 7 Matriz de comparación fuentes de electricidad

	Matriz de comparación Fuente electricidad							
	CertifHy		TÜV SÜD	China Hydrogen Alliance			Green Hydrogen Standard	
	Green H ₂	Low-Carbon H ₂	CMS 70 Green H ₂	Renewable Hydrogen	Clean Hydrogen	Low Carbon Hydrogen	Low Carbon Hydrogen	
						N/A		
Colombia	5		3	5			N/A	3

Muy alineado al análisis del atributo anterior, Colombia ha desarrollado la regulación para incluir en su matriz eléctrica diferentes fuentes de energía, y ha publicado una serie de normativas

iniciales para fomentar la diversidad de la matriz eléctrica, por lo cual un mecanismo con mayores posibilidades de fuentes de electricidad le convendría más al país. Ahora bien, una de las razones por las cuales CertifHy y China Hydrogen Alliance tienen la mejor calificación, se complementan con las definiciones que busca decretar el proyecto de ley 275 del 2022 [42], el cual busca complementar las ya existentes definiciones de hidrógeno en el país de la siguiente manera:

Hidrógeno Cero Emisiones: Hidrógeno generado a partir del uso de fuentes no convencionales de energía renovables (FNCER), tales como el biogás, la biomasa, los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos, la eólica, el calor geotérmico, la solar, la mareomotriz, entre otros; por medio de procesos vinculados a la electrólisis, de oxidación parcial, pirólisis y reformado de metano y gas de síntesis por reformado autotérmico; entre otros procesos que habiliten la oferta de hidrógeno de cero emisiones. De igual manera contempla las condiciones de uso de energía eléctrica autogenerada o tomada de la red para proyectos de producción de hidrógeno verde; donde la totalidad de la energía proveniente de la red debe ser respaldada con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER). El concepto es extensivo más no exclusivo a la definición de hidrógeno verde.

Hidrógeno de bajas Emisiones: Hidrógeno generado a partir del uso de hidrocarburos extraídos del suelo (gas natural, carbón y petróleo), por medio de procesos vinculados a la gasificación, oxidación parcial, pirólisis y reformado de metano, aplicando como postproceso tecnologías de captura, uso y almacenamiento de carbono (CCUS); entre otros procesos que habiliten la oferta de hidrógeno de bajas emisiones. El concepto es extensivo más no exclusivo a la definición de hidrógeno azul.

Estas definiciones contemplan el uso de electricidad proveniente de la red, siempre y cuando esta cumpla con ser 100% de FNCER, si esto se llegase a cumplir en algún momento, sería ideal que el mecanismo adoptado por el país permita como fuente para el proceso de electrólisis el SIN. Otro punto importante a resaltar en el análisis de este atributo, es que de acuerdo a los cálculos realizados para conocer el valor de $\text{kg CO}_2\text{e/kg H}_2$ producido por el SIN actual y a pesar de que este por arriba de los límites de los mecanismos estudiados, el valor no está alejado de los valores exigidos, por lo cual se realiza el cálculo para conocer cuál sería el valor de emisiones de CO_2eq

asociados a la red eléctrica del país para así poder producir hidrógeno de bajas emisiones cumpliendo con los límites de 4.9 y aprovechar los dos mecanismos que tiene sellos de bajas emisiones.

$$4.9 \frac{kgCO_2e}{KgH_2} \div 57.86 \frac{KWh}{KgH_2} = 0.085 \frac{kgCO_2e}{KWh}$$

Según XM, [32] la variación del factor de emisión del SIN en comparación con el año 2021 fue de -11%. Si esta reducción se mantuviera por los próximos 3 años debido a la incorporación de los nuevos proyectos de energía renovable, llegaríamos a un factor de 0,07929 ton CO₂eq/MWh, lo cual nos permitiría usar la energía proveniente de la red eléctrica para generar hidrógeno de bajas emisiones bajo los requerimientos de CertifHy y China Hydrogen Alliance.

6.5. Adicionalidad

De acuerdo con el decreto 1476 de 2022 los proyectos de hidrógeno verde “podrán utilizar energía eléctrica autogenerada o tomada de la red. La totalidad de la energía proveniente de la red debe ser respaldada con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), para lo cual se deberá suscribir un contrato bilateral de suministro de energía a partir de Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), además de contar con certificados de energía renovable expedidos por un tercero bajo estándares internacionales reconocidos y verificables a través de una plataforma de consulta pública de registro.”[31]

De acuerdo con lo descrito anteriormente se puede concluir que en Colombia en este momento para los proyectos de hidrógeno no se obliga a tener una generación dedicada solo para la producción de dicho vector.

Sin embargo, en el Plan Energético Nacional contempla que la producción de hidrógeno verde se impulse mediante la masificación de la generación de energía a partir de plantas solares [36]. Por lo anterior, la calificación de Colombia en comparación con todos mecanismos analizados para el atributo de Adicionalidad se puede observar en la siguiente tabla.

Tabla 8. Matriz de ponderación Adicionalidad

Matriz de ponderación Adicionalidad							
	CertifHy		TÜV SÜD	China Hydrogen Alliance			Green Hydrogen Standard
	Green H ₂	Low-Carbon H ₂	CMS 70 Green H ₂	Renewable Hydrogen	Clean Hydrogen	Low Carbon Hydrogen	Low Carbon Hydrogen
	Si	No	Si	No	No	N/A	Si
Colombia	5		4	5			4

Fuente: Elaboración propia

En este caso los mecanismos que tienen una calificación más alta, es gracias a que en el mismo certificado da la posibilidad de tener las dos opciones. Si bien la adicionalidad garantizaría que los proyectos de hidrógeno no hagan que se presente inconvenientes con la respuesta a la demanda, es necesario conocer las restricciones que pueden tener los proyectos de energía renovable en el país en cuantos temas de ejecución y que adicional el recurso eólico y solar no está distribuido a lo largo de todo el territorio, sino que se encuentra concentrado en la zona caribe. Lo anterior, eventualmente limitaría la adición de un proyecto de generación renovable para cumplir con la demanda de producción de hidrógeno que tiene el país.

6.7. Cadena de custodia

Colombia debe definir si la trazabilidad se hará por balance de masa o book-and-claim, siendo el primero requerido para una contabilidad de emisiones hasta el punto de uso, y el último generalmente usado para esquemas cuyo límite de contabilidad de emisiones es el punto de producción [5].

Por lo que el país deberá definir mediante una regulación cual será la cadena de custodia a utilizar o si se podrá utilizar cualquiera de las mencionadas. Por lo anterior, y debido a que actualmente no se tiene definido en ninguna parte de la regulación emitida la posible cadena de custodia de los certificados de H₂, la calificación de Colombia en comparación con todos mecanismos analizados para el atributo de Adicionalidad es 0 para todos los mecanismos.

Tabla 9 Matriz de ponderación Cadena de Custodia

Matriz de comparación Cadena de custodia							
	Certifhy		TÜV SÜD	China Hydrogen Alliance			Green Hydrogen Standard
	Green H2	Low-Carbon H ₂	CMS 70 Green H ₂	Renewable Hydrogen	Clean Hydrogen	Low Carbon Hydrogen	Low Carbon Hydrogen
	Book & Claim	Book & Claim	Book & Claim Balance de Masa	Book & Claim	Book & Claim	Book & Claim	Not Specified
Colombia	0	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

6.8. Recomendación de adopción para Colombia

Como resultado de la suma de las ponderaciones de cada uno de los atributos, se obtiene la siguiente tabla:

Tabla 10. Resultados de análisis de mecanismos

Certificado	Valoración final
CertifHy	15
China Hydrogen Alliance	15
TÜV SÜD	12
Green Hydrogen Standard	9

Fuente: Elaboración propia

Es evidente que los mecanismos que más se alinean al presente regulatorio del país son el de CertifHy y del China Hydrogen Alliance, y esto a su vez, genera una gran ventaja para Colombia ya que para el 2030 se espera una demanda global muy alta de los mercados europeos y de China [43].

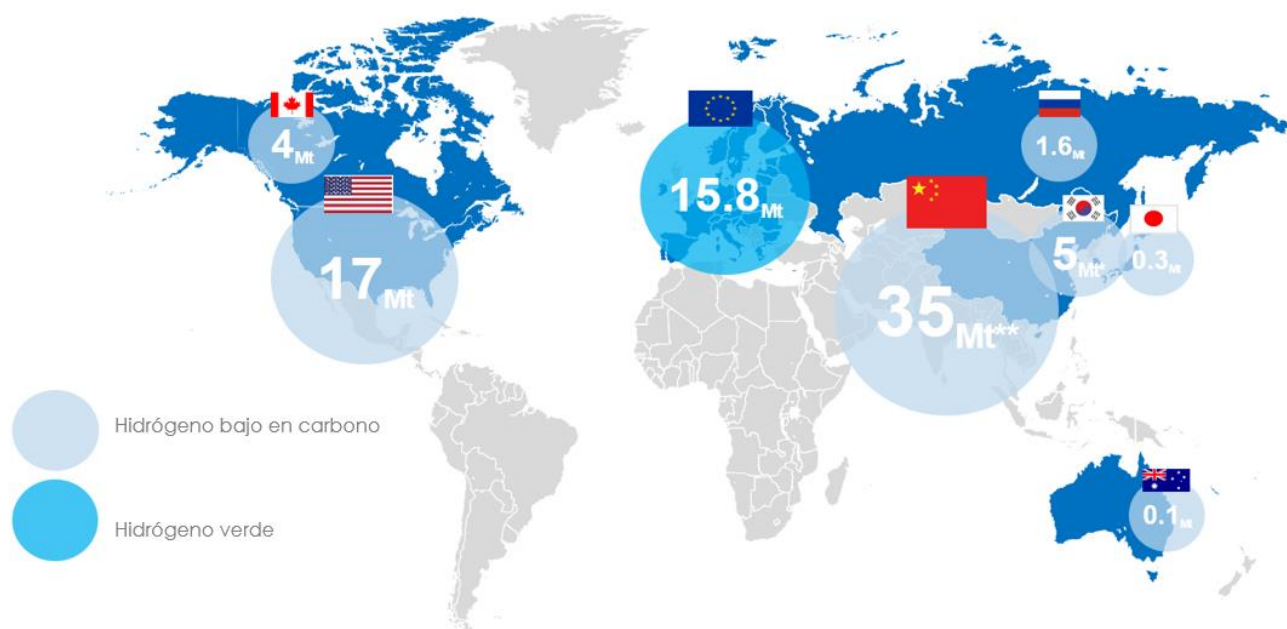


Figura 16. Demanda local prevista de hidrógeno renovable y bajo en carbono para 2030 de acuerdo con la estrategia nacional de hidrógeno existente de cada país.

Fuente: [43]

Si bien el resultado cuantitativo es fácil de determinar, después de analizar cada uno de los atributos y la normatividad asociada a cada uno de ellos, si es preocupante que aún no se tengan definidos diferentes aspectos esenciales como por ejemplo los límites de índice de huella de carbono para los tipos de hidrógeno que se pueden producir actualmente en el país y sus límites de contabilidad.

Colombia tiene como prioridad empezar a definir los siguientes aspectos con el fin de acelerar el proceso de certificación de origen de hidrógeno buscando crear un sello que cumpla con los atributos ya discutidos de los certificados de mayor ponderación encontrados en este trabajo:

- Definición de los límites emisiones asociados a la producción de hidrógeno

Como parte de la recomendación se proponen la siguiente definición de límites basado en la

metodologías aplicadas por CertifHy y el mecanismo Chino en donde se establece una línea base de acuerdo con la alta disponibilidad actual para la producción de H₂.

Según Cobo et al [35] la clasificación apropiada para el mercado Colombiano debería ser:

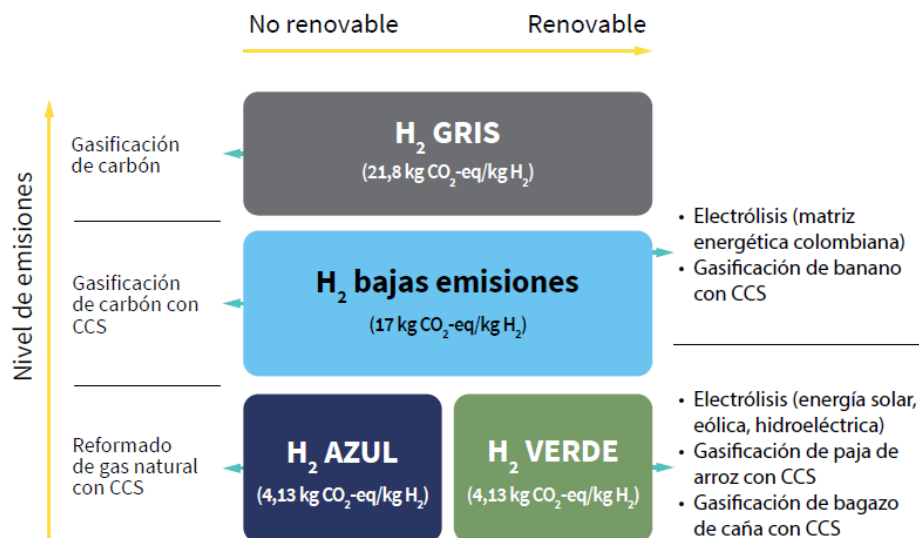


Figura 17 Propuesta de límites de emisiones de CO₂ para el mercado colombiano

Fuente: [35]

Estos niveles de emisiones deberían agregarse a las definiciones actuales que se tienen en la regulación colombiana, y que, a su vez, se alineen a los resultados de la ponderación ya que este límite de 4.13 kg CO₂e/kgH₂ estaría por debajo de los requeridos por CertifHy y China Hydrogen Alliance.

- Legislación para la generación de bonos de intensidad de emisiones para generadores de energía eléctrica con FNCER.

Como se identificó en el análisis de emisiones, Colombia no está lejos de producir hidrógeno con energía del SIN, ya que los sellos de mayor ponderación lo permiten, es de suma importancia que se cree un sistema de bonos de intensidad de emisiones asociadas a la generación de energía, en donde se pueda realizar una correcta trazabilidad de las emisiones de CO₂eq y así se logre la meta de 4.13kgCO₂eq/KgH₂.

- Definición de actores

Es importante que se designen y se aprovechen algunas entidades ya creadas para la generación del mecanismo, por ejemplo, la designación de la Organización Nacional de Acreditación ONAC como entidad de acreditación de los cuerpos de certificación. Otro de los actores importantes para una posible certificación debería ser el Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación ICONTEC el cual podría generar los certificados de origen de acuerdo con los lineamientos y disposiciones dadas por el Ministerio de Minas y Energía, Ambiente.

- Plataforma para la trazabilidad, consulta y venta de certificaciones de origen de hidrógeno.

Como se pudo determinar, los mecanismos de mayor calificación tienen como requisito de cadena de custodia Book & Claim por lo cual se hace sumamente necesario contar con una plataforma en la cual se puedan intercambiar los mecanismos de certificación de origen emitidos.

- Certificación propia

Como se comentó en capítulos anteriores se está trabajando en un certificado regional que incluye la participación de varios países, luego de analizar las diferentes variables y particularidades de Colombia, sumamos a la recomendación tener un mecanismo propio antes que uno regional. Si bien sería muy bueno fomentar el mercado regional, es claro que el mercado objetivo del país será Europa y en alguna medida China y Corea, por lo cual de poco servirá tener un mecanismo regional si no se cumplen con los requisitos mínimos de producto de los países compradores. Adicional, Colombia es uno de los pocos países de la región que cuenta con una oferta de recurso renovable bastante amplia y con índices de CO₂eq bajos, por lo cual valdría la pena que los límites de emisión que se configuren para los diferentes tipos de hidrógeno sean los más acordes para la realidad del país, si se tienen en cuenta las realidades de todos los países participantes de la región, seguramente los límites de emisiones no cumplirán con los objetivos de exportación trazados en la Ruta de Hidrógeno.

Capítulo 7

CONCLUSIONES

A partir del análisis establecido anteriormente con cada uno de los mecanismos y atributos se puede concluir lo siguiente:

- A pesar de que Colombia tiene contemplado el hidrógeno como una fuente de energía no convencional la cual puede ayudar a la descarbonización del país y del mundo siendo exportador de dicho vector, aun no cuenta con una regulación la cual defina el proceso que se debe cumplir para obtener la certificación de origen.
- El ministerio de minas y energía debe definir los atributos que se deben tener en cuenta en la producción de hidrógeno y así mismo establecer los límites de $\text{kg CO}_2\text{eq/kgH}_2$ a cada tipo de producto de este vector, valdría la pena que esta definición se alinee a la recomendación establecida en este documento para que así se promueva a corto plazo el uso del hidrógeno de bajas emisiones de manera interna y a su vez se cumpla con los atributos requeridos por los mecanismos internacionales para fines de exportación.
- El ministerio de minas y energía debe delimitar que actores deben involucrarse en el desarrollo de certificación de origen de H_2 y las funciones de cada uno de ellos en el proceso, sin esto, ni la adaptación ni la definición de un mecanismo de certificación de origen será posible de desarrollar.
- Los mecanismos que más se adaptan a lo que Colombia tiene contemplado para impulsar la producción de hidrógeno con fines de exportación son CertifHy y China Hydrogen Alliance, para que estos mecanismos se puedan implementar en el país se debe definir los atributos que estos requieren para su cumplimiento.
- Los mecanismos con mayor ponderación de este análisis contemplan sellos para hidrógeno proveniente de fuentes fósiles con utilización o captura del carbono asociado a la producción, sin duda este es uno de los mercados en los cuales Colombia gracias al recurso y la experiencia disponible podría incursionar de mejor manera, sin embargo, si no se acelera en la reglamentación y tecnificación para los procesos de CCUS y CCS. que promueva este mercado, el país perderá esta oportunidad debido a que todos los

mecanismos internacionales requieren de una trazabilidad, conteo y registro de emisiones asociadas al proceso de producción.

- Como parte de las recomendaciones, es importante decir que Colombia debería tener un mecanismo propio cuyos requisitos cumplan con los atributos de mecanismos como CertifHy y China Hydrogen Alliance.
- Teniendo en cuenta que en la actualidad se encuentra en desarrollo un mecanismo de certificación regional CertHiLAC, como parte de un estudio futuro sería valioso realizar una comparación de este mecanismo con los certificados de mayor ponderación encontrados en este proyecto, adicional gracias a la gran experiencia de Colombia en la industria petrolera, el país puede ser potencia en la generación de H₂ azul, sin embargo para que lo anterior suceda, se requiere que se desarrollen avances en la legislación y tecnificación de tecnologías de captura y uso de carbono.

REFERENCIAS

- [1] S. Aldana Rivera y F. A. León Pañuela, *Hidrógeno en Colombia SI SE HACE MAL, PODRÍA SER PEOR* / *Heinrich Böll Stiftung* / *Bogotá office - Colombia*, Fundación Heinrich BÖLL. Bogotá, 2022. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://co.boell.org/es/2023/01/19/hidrogeno-en-colombia-si-se-hace-mal-podria-ser-peor>
- [2] Ministerio de Minas y Energía, “Hoja de ruta del Hidrógeno en Colombia”, Ministerio de Minas y Energía, Bogotá, Hoja de Ruta, 2021. Consultado: el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://www.minenergia.gov.co/documents/5861/Hoja_Ruta_Hidrogeno_Colombia_2810.pdf
- [3] RINA S.p.A y Accenture, “The colours of hydrogen routes (The many shades of hydrogen)”. Rina ORG. Consultado: el 25 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://scresources.rina.org/resources/Documents/The%20colors%20of%20Hydrogen%20routes-11032021.pdf>
- [4] A. Astobiza Tamame, “Producción de hidrógeno por oxidación parcial de metano sobre espinelas de aluminato de níquel”, Trabajo de fin de grado ingeniería Química, Unversidad del País Vasco, España, 2016. Consultado: el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://addi.ehu.es/handle/10810/18080>
- [5] A. Ángel y J. S. Márquez, “Estándares de sostenibilidad para la regulación del mercado de hidrógeno: estudio de certificación de hidrógeno”, Banco Interamericano de Desarrollo, Bogotá, oct. 2022. doi: 10.18235/0004432.
- [6] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, “Estrategia 2050”, Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minambiente.gov.co/cambio-climatico-y-gestion-del-riesgo/estrategia-2050/>
- [7] “El Acuerdo de París | CMNUCC”. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/el-acuerdo-de-paris>
- [8] Centro Nacional del Hidrógeno, “El Hidrógeno”, Centro Nacional de Hidrógeno. Consultado: el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.cnh2.es/el-hidrogeno/>
- [9] F. Boshell, “Tendencias en la transición energética global Hidrógeno Verde Sostenible e Innovación”, presentado en 2º Congreso Colombiano de Hidrógeno, Bogotá, 2023.
- [10] “CertHiLAC: Sistema de certificación de hidrógeno limpio para América Latina y el Caribe”, Energía para el Futuro. Consultado: el 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.iadb.org/energia/es/certhilac-sistema-de-certificacion-de-hidrogeno-limpio-para-america-latina-y-el-caribe/>
- [11] M. Torres, “Marco legal y regulatorio del hidrogeno en Colombia”. el 19 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.andi.com.co/Uploads/9.20%20MONICA%20TORRES_638342561221515004.pdf
- [12] L. Sánchez de Rojas Huerta, “Certifying green hydrogen’s origin through blockchain”, masters, E.T.S. de Ingenieros Informáticos (UPM), España, 2021. Consultado: el 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://oa.upm.es/68722/#>
- [13] E. L. R. S.A.S, “Estos son los desafíos y barreras legales que hay en regulación para usar hidrógeno”, Diario La República. Consultado: el 1 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible

- en: <https://www.larepublica.co/especiales/hidrogeno-en-la-transicion/estos-son-los-desafios-y-barreras-que-hay-en-regulacion-de-hidrogeno-verde-3727431>
- [14] E. L. R. S.A.S, ““La meta a 2030 es producir hidrógeno verde, y tener normas e infraestructura lista””, Diario La República. Consultado: el 2 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.larepublica.co/especiales/hidrogeno-en-la-transicion/el-h2-tour-colombia-que-inicia-por-region-caribe-llegara-a-potenciales-zonas-de-produccion-para-masificar-el-hidrogeno-3727358>
- [15] HINICIO, “ENTREGABLE 3 ‘Reporte Final de Recomendaciones’”, Número de selección: 1277448, 2022. Consultado: el 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/es/micrositios/enlace-ruta-hidrogeno/>
- [16] Department for Business, Energy & Industrial Strategy, “Consultation on a UK low carbon hydrogen certification scheme”. 2023. Consultado: el 17 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.gov.uk/government/consultations/uk-low-carbon-hydrogen-certification-scheme>
- [17] Á. R. Haczek, “Qué es el ‘greenwashing’ y cómo evitar que te engañen”, CNN. Consultado: el 5 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://cnnespanol.cnn.com/2021/11/05/greenwashing-explainer-orix/>
- [18] International Energy Agency IEA, “Global Hydrogen Review 2022”, IEA, Review 2022, 2022. Consultado: el 23 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2022>
- [19] R. Guzmán, “Introducción al panel de lecciones aprendidas en el desarrollo de Proyectos de Hidrógeno”, presentado en 2º Congreso Colombiano de Hidrógeno, Bogotá, 2023.
- [20] CertifHy Consortium, “Steps of certification”, CERTIFHY. Consultado: el 26 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.certifhy.eu/steps-of-certification/>
- [21] Asociación de hidrógeno, “Certificación de Hidrógeno - Comisión Europea”. Consultado: el 11 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.clean-hydrogen.europa.eu/get-involved/hydrogen-certification_en
- [22] PwC - Strategy&, “Guía para la adopción de garantías de origen para el hidrógeno verde en México”. septiembre de 2022.
- [23] TÜV SÜD, “Certificación Hidrógeno Verde”, TÜV SÜD. Consultado: el 29 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.tuvsud.com/es-es/temas/hidrogeno/servicios-hidrogeno/certificacion-hidrogeno-verde>
- [24] TÜV SÜD, “TÜV SÜD Standard CMS 70 Production of green hydrogen (GreenHydrogen)”, TÜV SÜD, Munich Alemania, Versión 11, 2021. Consultado: el 26 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.tuvsud.com/es-es/-/media/global/pdf-files/brochures-and-infosheets/tuvsud-cms70-standard-greenhydrogen-certification.pdf>
- [25] W. Liu, Y. Wan, Y. Xiong, y P. Gao, “Green Hydrogen Standard in China: Standard and Evaluation of Low-Carbon Hydrogen, Clean Hydrogen, and Renewable Hydrogen”, en *Hydrogen Sourced from Renewables and Clean Energy: A Feasibility Study of Achieving Large-scale Demonstration*, Y. Li, H. Phoumin, y S. Kimura, Eds., ERIA, 2021, pp. 211–224. Consultado: el 26 de agosto de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.eria.org/research/hydrogen-sourced-from-renewables-and-clean-energy-a-feasibility-study-of-achieving-large-scale-demonstration/>

- [26] The Green Hydrogen Organisation, “Green Hydrogen Standard”, Australia, E Version 1.1, 2023. Consultado: el 27 de septiembre de 2023. [En línea]. Disponible en: https://gh2.org/sites/default/files/2023-01/GH2_Standard_A5_JAN%202023_1.pdf
- [27] N. Hartmann, V. Pradelli, J. S. Márquez, C. Gischler, E. F. Boeck Daza, y P. Galeano, “Guide for Implementation of a Hydrogen certification System in Latin America and the Caribbean”. Inter-American Development Bank, diciembre de 2023.
- [28] Departamento Nacional de Planeación, “Visión Colombia 2050 Discusión sobre el país del futuro”, Bogotá, 2022. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Prensa/Publicaciones/Documento_vision_colombia_2050.pdf
- [29] R. IRENA, *Creating a global hydrogen market: Certification to enable trade*. Colorado, 2023. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/Publications/2023/Jan/Creating-a-global-hydrogen-market-Certification-to-enable-trade>
- [30] Senado de la república de Colombia, *Ley 2099 de 2021 - Gestor Normativo - Función Pública*. 2021. Consultado: el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326>
- [31] Ministerio de Minas y Energía, *Decreto 1476 de 2022 Ministerio de Minas y Energía - Gestor Normativo - Función Pública*. 2022. Consultado: el 21 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=191408>
- [32] “Resultado de cálculo de Factor de Emisión del Sistema Interconectado Nacional, para inventario de Gases de Efecto Invernadero.”, Portal XM. Consultado: el 5 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.xm.com.co/noticias/5548-resultado-de-calculo-de-factor-de-emision-del-sistema-interconectado-nacional-para>
- [33] A. Vilela, “AEG suministra equipo a H2B2 para sus operaciones de hidrógeno verde con el Grupo Ecopetrol en Bogotá”, H2 Business News. Consultado: el 5 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://h2businessnews.com/aeg-suministra-equipo-a-h2b2-para-sus-operaciones-de-hidrogeno-verde-con-el-grupo-ecopetrol-en-bogota/>
- [34] “Hydrogen Electrolyser EL30N”, H2B2 Electrolysis Technologies. Consultado: el 5 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.h2b2.es/el30n/>
- [35] M. I. Cobo Ángel, C. L. Barraza Botet, N. M. Cantillo Cuello, y M. Á. Uribe Laverde, *Recomendaciones para el desarrollo de la economía del hidrógeno en Colombia: Una estrategia nacional de hidrógeno*. Chía: Universidad de La Sabana, 2022.
- [36] Unidad de Planeación Minero Energética UPME, “PEN 2052”, Bogotá, 2023. Consultado: el 5 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN-2052.aspx>
- [37] D. Escobar Carbonari, J. B. Valencia, J. S. Vanegas, y L. M. Ramos Lizcano, “CONVENIO DE COOPERACION INTERNACIONAL GGC No. 632 de 2021 CELEBRADO ENTRE EL MINISTERIO DE MINAS Y ENERGIA Y CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT)”. 2021. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.minenergia.gov.co/documents/1>

0223/CONVENIO_DE_COOPERACION_INTERNACIONAL_GGC_No._632_de_2021.pdf

- [38] E. Yáñez, A. Ramírez, V. Núñez-López, E. Castillo, y A. Faaij, “Exploring the potential of carbon capture and storage-enhanced oil recovery as a mitigation strategy in the Colombian oil industry”, *Int. J. Greenh. Gas Control*, vol. 94, p. 102938, mar. 2020, doi: 10.1016/j.ijggc.2019.102938.
- [39] “Reglamentar parcialmente artículos 22 y 57 Ley 2099 de 2021, el artículo 264 Ley 2294 de 2023 adopta el PND 2022-2026”. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.minenergia.gov.co/es/servicio-al-ciudadano/foros/reglamentar-parcialmente-art%C3%ADculos-22-y-57-ley-2099-de-2021-el-art%C3%ADculo-264-ley-2294-de-2023-adopta-el-pnd-2022-2026/>
- [40] Congreso de Colombia, *Ley 1715 de 2014 - Gestor Normativo - Función Pública*. Consultado: el 6 de noviembre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=57353>
- [41] “Tipos”, Portal XM. Consultado: el 20 de octubre de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.xm.com.coPortal XM>
- [42] Congreso de Colombia, *Por medio del cual se promueve e incentiva el desarrollo del ecosistema del hidrógeno de cero y bajas emisiones en Colombia con el fin de garantizar una correcta transición energética y se dictan otras disposiciones – Economía del Hidrógeno*”. 2022, p. 27. [En línea]. Disponible en: <chrome-extension://efaidnbmninnibpcjpcglclefindmkaj/https://www.camara.gov.co/sites/default/files/2022-11/P.L.275-2022C%20%28HIDROGENO%29.pdf>
- [43] L. M. Granados y J. Gonzalez, “Aplicaciones del H2 en Industria y Exportación”, presentado en Clase de Hidrógeno Universidad del Rosario, Bogotá, 2023.