El hidrogeno verde, la biomasa, el rio y el transporte fluvial

Mario Cujar Coutin

Universidad Icesi
Maestría en Sostenibilidad
Programas Interdisciplinarios
Diciembre, 2024
Cali, Colombia

El hidrogeno verde, la biomasa, el rio y el transporte fluvial

Mario Cujar Coutin

Trabajo de Grado para optar al título de Máster en Sostenibilidad

Director del Proyecto
Alfredo Marin Jaramillo

Universidad Icesi
Maestría en Sostenibilidad
Programas Interdisciplinarios
Diciembre, 2024
Cali, Colombia

Resumen

La cuenca del rio Atrato, es una región rica en recursos naturales como la biomasa virgen y residual presentes en la cuenca del rio Atrato (Maleza acuática como el jacinto de agua, lodos de PTAR, residuos forestales y agrícolas. (Anexo 1, tipos de biomasa y potencial energético) y con uno de los mayores potenciales hídricos del país que la hacen una fuente de energía renovable para la producción de hidrogeno verde, enfrenta serios desafíos ambientales y sociales debido a la minería ilegal y al conflicto armado, este proyecto propone la producción de hidrogeno verde a partir de la biomasa que se genera en la región y se está desperdiciando, aprovechando también el potencial hidroenergético del rio Atrato y sus afluentes.

La producción de hidrogeno verde, contribuye a la conservación y restauración de los ecosistemas degradados por la minería ilegal, busca también promover el desarrollo económico y social de la comunidad creando empleo y el fortalecimiento de la infraestructura eléctrica, la infraestructura fluvial de la región acompañada de la conversión de los buques propulsados por sistema diesel a sistemas propulsado con nitrógeno. La producción de energía limpia de biomasa es una alternativa para eliminar el uso de la leña en esta región y genera energía como alternativa para las comunidades que están por fuera del sistema de interconexión eléctrica.

Este proyecto representa una oportunidad para transformar la región, aprovechando sus recursos naturales de manera sostenible y promoviendo un desarrollo económico y social inclusivo. Este enfoque integral no solo busca generar energía limpia, sino también mejorar la calidad de vida de sus habitantes y contribuir a la paz y la prosperidad en una región históricamente afectada por la violencia y la ilegalidad.

Recuperar el transporte de carga por el rio Atrato, históricamente antes del conflicto era la vía principal para el ingreso de carga a la región.

La producción de hidrogeno verde, es una solución basada en la naturaleza y una opción de economía circular.

Palabras claves: Producción de hidrogeno verde, biomasa, rio, energía, electrolisis, GEI, cambio climático, calentamiento global, transporte fluvial, desarrollo social y económico

Abstract

The Atrato River basin is a region rich in natural resources such as virgin and residual biomass present in the Atrato River basin (Aquatic weeds such as water hyacinth, WWTP sludge, forestry and agricultural waste. (Annex 1, types of biomass and energy potential) and with one of the largest water potentials in the country that make it a source of renewable energy for the production of green hydrogen, it faces serious environmental and social challenges due to illegal mining and armed conflict, this project proposes the production of green hydrogen from the biomass that is generated in the region and is being wasted, also taking advantage of the hydroelectric potential of the Atrato River and its tributaries.

The production of green hydrogen contributes to the conservation and restoration of ecosystems degraded by illegal mining, it also seeks to promote the economic and social development of the community by creating employment and strengthening the electrical infrastructure, the river infrastructure of the region accompanied by the conversion of diesel-powered ships to nitrogen-powered systems. The production of clean biomass energy is an alternative to eliminate the use of firewood in this region and generates energy as an alternative for communities that are outside the electrical interconnection system.

This project represents an opportunity to transform the region, taking advantage of its natural resources in a sustainable way and promoting inclusive economic and social development. This comprehensive approach not only seeks to generate clean energy, but also to improve the quality of life of its inhabitants and contribute to peace and prosperity in a region historically affected by violence and illegality.

Recovering cargo transport along the Atrato River, historically before the conflict it was the main route for the entry of cargo into the region.

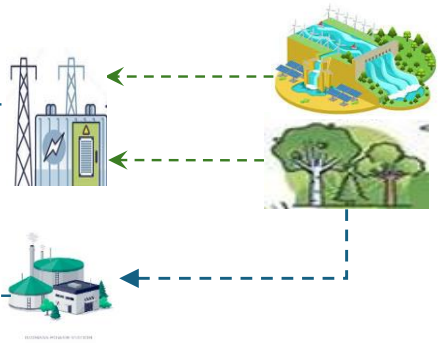
The production of green hydrogen is a nature-based solution and a circular economy option.

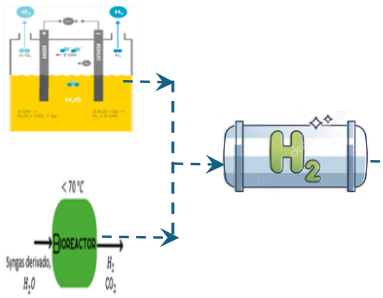
Keywords: Green hydrogen production, biomass, river, energy, electrolysis, GHG, climate change, global warming, river transport, social and economic development

Resumen Gráfico

Cuenca del rio Atrato
Rica en biomasa virgen biomasa residual, alta riqueza hidrica.
Fuentes de energia primaria
ALTO POTENCIAL ENERGETICO
Afectada por la mineria ilegal

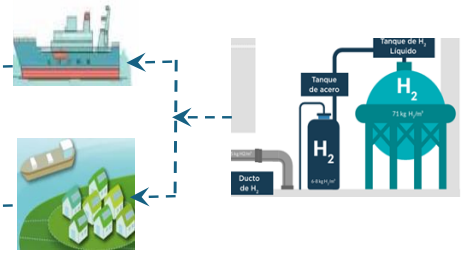
Generarción de energia secundaria a partir del potencial hidroenergetico y el potencial energetico de la biomasa.
Subproductos de la biomasa





HIDROGENO VERDE
Conversión por:
Electrolisis
Procesos Bioquimicos
Procesos Termoquimicos

HIDROGENO VERDE
Conversión de embarcaciones Diesel a H2 para el transporte de carga y pasajeros por el rio Atrato
Energia para uso residencial, energia para comunidad por fuera del sistema interconectado



- Cuenca del rio Atrato: carbono neutro a 2050
- Integración al sistema intermodal nacional, terrestre, fluvial, maritimo con salida hacia los dos oceanos (Puerto Antioquia, Puerto Buenaventura, via cuenca de los rios Atrato y San Juan, via terreste Antioquia y eje cafetero)
- Equidad y desarrollo territorial, tejido social robusto.
- Recursos naturales recuperados, protegidos y aprovechados

Fuente: Desarrollo propio

Introducción

En la COP26, Colombia presentó un objetivo de cero emisiones netas y una ambiciosa Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC), que apunta a una reducción del 51% en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para 2030. Estas ambiciones se reflejan en la estrategia a largo plazo, la Estrategia E2050, la Ley de Transición Energética y la Ley de Acción Climática (IEA, 2023).

El hidrógeno verde, la biomasa, el rio y el transporte fluvial son una opción para devolver a las comunidades a lo largo de la cuenca del rio Atrato los derechos perdidos en el tiempo como consecuencia del conflicto armado, el abandono estatal. Estas pueden converger de manera sostenible en el rio para devolver a la comunidad el derecho a la vida, a la salud, y un medio ambiente sano (Invias, 2012) y contribuir significativamente al desarrollo sostenible y al bienestar de las comunidades locales a partir de la producción de hidrogeno verde.

El rio Atrato ha sido fuertemente afectado por minería ilegal mediante la explotación indiscriminada del oro que produce efectos devastadores sobre los ríos, las personas y el medio ambiente: Contaminación con mercurio y cianuro, alteración de los cauces de los ríos y efectos sobre el transporte fluvial, pérdida de biodiversidad y efectos directos sobre la salud de las personas. Por otra parte, según el Censo Minero realizado por el Ministerio de Minas y Energía entre 2010 y 2011 se censaron en el departamento del Chocó 527 unidades de producción minera, de las cuales el 99.2% no contaban con título minero inscrito en el registro nacional minero, lo cual implica que trabajan en la ilegalidad (Constitucional, 2016). El desarrollo de la actividad minera en el río y sus afluentes a alcanzado un nivel de deforestación, que según informe de la organización World Wildlife Fund -WWF- se calcula aproximadamente en 44 mil hectáreas de selva primaria devastada (Constitucional, 2016), adicionalmente, los efectos ocasionados por la misma comunidad y el abandono estatal, el rio Atrato es el tercer río navegable más importante del país, atraviesa 33 municipios (19 en Chocó y 14 en Antioquia) y es hogar de más de 400.000 personas que lo utilizan como principal medio de transporte, fuente de agua y alimento (Constitucional, 2016), arrojan los residuos sólidos y las aguas residuales directamente al rio por la ausencia plantas de tratamiento de vertimientos domésticos, no existen sitios para disposición de los residuos sólidos (Invias, 2012), la deforestación ocasionada por la tala de árboles para

madera y el no aprovechamiento de la biomasa vegetal generada en los bosques y la maleza acuática (Buchón de agua) a lo largo del rio y las ciénagas que hacen parte de esta cuenca.

La producción de hidrogeno a partir de la biomasa y el aprovechamiento del caudal del rio son importantes para la generación de energía, hay un potencial de producción de hidrogeno verde de 467,955.4 tn/año, producción a partir de electrolisis y otras tecnologías a partir de la biomasa como la gasificación y el reformado de biogas. La mitigación del cambio climático, y el calentamiento global, al ser fuentes de energía limpia y de cero emisiones para la producción de hidrogeno, son alternativas para la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y devolver a las comunidades los derechos vulnerados, generando empleo, formación técnica para la comunidad a partir de la producción de hidrogeno verde y por la recuperación del transporte fluvial.

Finalmente, podemos ver cómo pueden aprovecharse en busca de un objetivo común el hidrogeno verde, la biomasa, el rio y el transporte fluvial para mitigar los efectos del cambio climático y el calentamiento global generando energía limpia y regresando a las comunidades oportunidades de desarrollo como lo pide también la sentencia T622-16, que declaro el rio Atrato como sujeto de derechos (Constitucional, 2016).

Contexto del problema

El Chocó se asienta en una de las regiones más biodiversas del planeta conocida como el Chocó biogeográfico, es uno de los territorios más ricos en diversidad natural, étnica y cultural de Colombia, el 90% del territorio es zona especial de conservación y cuenta con varios parques nacionales. La cuenca del río Atrato con 40.000 km2 representa poco más del 60% del área del departamento y es considerada una de las de mayor rendimiento hídrico del mundo con 750 km de longitud.

Su desembocadura se divide en siete bocas, cuyas aguas desembocan en el golfo de Urabá, actualmente cargadas de sedimento que solo permiten el paso de pequeñas embarcaciones (Invias, 2012). La llegada de los grupos armados del trío: fuerzas armadas del Estado, paramilitares y guerrillas, y la minería ilegal tecnificada han impuesto en la zona dinámicas de miedo, zozobra, negociaciones desventajosas y movilidad de desplazamiento forzado, lo que se ha traducido en salida de algunas personas, muertes y abandono de propiedades familiares. La siembra de cultivos ilícitos en los territorios ancestrales de estas etnias genera cambio en las relaciones de trabajo, ya

que muchos pobladores entran a ganarse un salario con estos grupos, en sus filas o en el trabajo que ofrecen, abandonando las prácticas tradicionales de menor ganancia inmediata en dinero, pero de mayor garantía en el tiempo de seguridad alimentaria (Invias, 2012).

En términos generales, los pueblos ubicados en la ribera del rio Atrato en los departamentos de Antioquia y Chocó, se caracteriza por presentar bajos niveles de desarrollo socioeconómico, generado por el desarrollo de sistemas productivos no sostenibles, bajo un modelo de uso meramente extractivo.

Del mismo modo, la cobertura en servicios públicos es insuficiente, sólo el 59,4% de las viviendas presentan el servicio de energía eléctrica, el 48,4% acueducto, el 26,3% alcantarillado. El sistema de acueducto presenta además una calidad bastante regular, debido a que las fuentes de agua existentes están contaminadas por el vertimiento de aguas residuales domésticas y de basuras de las poblaciones asentadas en las cabeceras municipales y corregimientos (Invias, 2012).

Además, de la falta de planta de tratamiento de vertimientos de aguas residuales, y de sitios para disposición de residuos sólidos en los municipios ubicados a lo largo de la cuenca del rio Atrato, la maleza acuática (Buchón de agua) está limitando las funciones de las ciénagas de la cuenca del río Atrato.

La sedimentación en las bocas del rio Atrato por la minería ilegal, la deforestación y falta de mantenimiento del rio, es un impedimento para la recuperación de la actividad económica y el movimiento de carga a lo largo de la cuenca del rio Atrato.

Fig. 1. Rio Atrato selva virgen

Fuente: (Constitucional, 2016)

Fig. 2. Deforestación por minería ilegal

Fuente: (Constitucional, 2016)

Fig.3. Maleza acuática-Explotación de madera

Fuente: IIAP

Figura 4. Rio Atrato transporte fluvial

Fuente: IIAP

El transporte fluvial por el rio Atrato, siempre se relacionaba con el puerto de Cartagena, su condición geográfica privilegiada fue en sus inicios un motor para el desarrollo del Chocó aprovechando las ventajas del transporte fluvial, las ventajas del rio y la infraestructura construida para atender el movimiento de carga a lo largo del rio Atrato (Doria, 2011). Por decisiones del gobierno nacional e inoperancia de los gobiernos locales, la corrupción y en gran parte también por la inseguridad generada por el conflicto armado fue abandonada, dejando a la deriva a las comunidades establecidas a lo largo de este rio y permitiendo hoy solo paso de pequeñas embarcaciones que utilizan combustibles fósiles de altas emisiones de GEI y contaminación directa de las fuentes hídricas por descargas y derrames de combustible y aceite, siendo el aprovechamiento de la biomasa de la cuenca del rio Atrato una opción para generar hidrogeno verde libre de emisiones de GEI, generar energía para la reactivación económica a lo largo del rio con embarcaciones usando hidrogeno como combustible.

Objetivo del Proyecto

Determinar el potencial y alternativas de producción de hidrogeno verde en la cuenca del rio Atrato como una alternativa sostenible para el transporte fluvial.

Objetivos Específicos

- Identificar los tipos de biomasa generados en la cuenca del rio Atrato para la producción de hidrogeno verde
- Determinar las distintas alternativas de producción del hidrogeno para la movilidad fluvial.
- Establecer alternativas de valor social derivadas de la producción de hidrogeno.

Metodología

A continuación, se describe la metodología desarrollada durante el proyecto para identificar los tipos de biomasa y el potencial hidroenergético en la cuenca del rio Atrato, determinar el potencial de producción de hidrogeno verde y alternativas para el uso de hidrogeno en la movilidad fluvial. Después de definir los tipos de biomasa, el potencial y alternativas de producción de hidrogeno y su uso en el transporte fluvial, se definieron las alternativas de valor social orientadas a mejorar las condiciones sociales y económicas para la comunidad y la región.

Análisis y revisión de experiencias

Se realizo revisión y análisis de experiencias relacionadas con la implementación de sistemas de producción de hidrógeno a partir del aprovechamiento de biomasa y aprovechamiento del caudal del rio en pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH).

Biomasa: Se realiza el análisis y revisión de fuentes nacionales a partir de entidades de orden nacional que estén encargadas de la planeación del desarrollo sostenible de los sectores de Minas y Energía en Colombia como lo es la UPME (Unidad de Planeación Minero-Energética) (UPME, 2008) y organizaciones de investigación científica internacionales, como la Agencia Nacional de Ciencias de Australia (CSIRO) que ha realizado informes de escaneos tecnológicos para la producción de hidrógeno, (CSIRO, 2019). Seguidamente, se analiza la información publicada por el Ministerio de Ambiente que tiene un plan de acción para la gestión sostenible de la biomasa residual en el país (Minambiente, 2022). Se consultan investigaciones de Universidades, Centros de Investigación, y entidades privadas sobre casos documentados, tecnologías desarrolladas y en desarrollo, que apunten al desarrollo de la biomasa como fuente energética (CQM Consultoria SAS, 2024).

PCH: Se consideraron tecnologías para alcanzar la producción de hidrogeno verde aprovechando el caudal del rio para pequeñas turbinas y para PCH para generación de energía que se utiliza en la producción de hidrogeno verde, sobre las cuales se enfocaron las investigaciones de las fuentes. Se hace una revisión de los proyectos de producción de hidrógeno a partir de proceso de electrólisis del agua, independientemente de la fuente primaria de producción de la electricidad y se establecen los proyectos utilizando PCH.

Disponibilidad

Biomasa: En primera instancia, se consolida o calcula la información asociada a la biomasa residual mediante los factores de residuos asociados a las producciones agrícolas en el país en fuentes primarias como el Ministerio de Agricultura Nacional y la UPME (UPME, 2008). Seguidamente, se identifican los mapas del sector de residuos sólidos orgánicos urbanos, del sector pecuario y del sector agrícola.

PCH: Se realiza un análisis del potencial hidro energético en la región, utilizando la información disponible en el Atlas de potencial hidro energético de Colombia, de la UPME (UPME, 2015) y empleando la información de potencial de plantas filo de agua con capacidades menores a 20 MW.

Un elemento para considerar es la disponibilidad real de los recursos primarios en las regiones con potencial, asociado con el uso dado a estos recursos actualmente, restricciones en la recolección del residuo, disposición en puntos de acopio para aprovechamiento. (CQM Consultoria SAS, 2024)

Depuración de tecnologías existentes

La depuración de tecnologías permitió seleccionar las mejores de acuerdo con su desarrollo y madurez. Se desarrollo utilizando la escala de madures tecnológica o Technology Readines Level (TRL) con origen en la NASA en 1970, es una herramienta utilizada para proyectos de evaluación tecnológica (Mecides, 2024). En Colombia esta herramienta es muy utilizada por Colciencias en la evaluación de proyectos y en la evaluación del nivel de madurez de los proyectos para producción de hidrogeno (Colciencias, Niveles de madurez tecnologica, 2016).

Se determina para el proyecto, seleccionar procesos con nivel de madurez TRL 9, que corresponde a procesos completamente desarrollados y probados en entorno real.

A continuación, en tabla 1, se presenta la descripción del nivel de madurez tecnológico para la selección de los procesos de producción.

TRL	Descripción	Entorno de prueba	Que se espera
TRL1	Observación de principios básicos	Teórico	Descubrimiento de principios científicos básicos
TRL2	Formulación de conceptos de tecnología.	Teórico	Identificación y formulación de aplicaciones prácticas del descubrimiento científico
TRL3	Prueba experimental de concepto	Laboratorio	Validación experimental de componentes tecnológicos aislados
TRL4	Validación de correspondientes en laboratorio	Laboratorio	Integración básica de componentes y validación en laboratorio
TRL5	Valides de sistema de entorno relevante	Simulación	Ensayo del sistema en un entorno similar al real
TRL6	Demostración de sistema o subsistema en entorno relevante	Simulación	Demostración del sistema en condiciones operativas relevantes o subsistema completo
TRL7	Demostración del sistema en entorno real	Real	Prueba del sistema completo en un entorno real o cercano a la aplicación final
TRL8	Sistema completo y certificado en entorno operativo	Real	Finalización del desarrollo tecnológico con validación y certificación
TRL9	Sistema completamente probado en entorno real	Real	Tecnología lista para ser implementada en su aplicación final

Tabla 1. TRL de acuerdo con el nivel de madurez tecnológico del proceso

Fuente: (Mecides, 2024)

Posteriormente, se identificaron y cuantificaron las fuentes de energía primaria disponibles y cuantificar el potencial de producción de hidrogeno verde de biomasa y del potencial hidro energético de la cuenca del rio Atrato.

El hidrogeno producido será utilizado principalmente en el transporte fluvial, lo que hace necesaria conversión de las embarcaciones con sistema de propulsión diesel a sistema propulsado con hidrogeno y energía para utilizar en viviendas que no hacen parte del sistema nacional interconectado de energía que utilizan combustible diesel para la generación de energía y utilizan también leña como energía, para suplir las necesidades energéticas para cocinar.

Finalmente, se definen las alternativas de valor social, utilizando la metodología de evaluación de impacto, la teoría del cambio, se definieron indicadores para seguimiento del proyecto durante su ejecución y durante la marcha.

Resultados y Discusión

La metodología desarrollada, permitió el proyecto avanzara en cada una de las etapas propuestas definidas para alcanzar los resultados esperados.

- Revisión de Investigaciones y experiencias relacionadas con la producción de hidrogeno verde
- Depuración de Tecnologías Existentes, de acuerdo con la madurez tecnológica de los procesos.
- Se identificaron los tipos de biomasa presentes en la cuenca del rio Atrato, cantidad y potencial para producción de hidrogeno verde.
- Se identifico posteriormente el potencial hidroenergético en la cuenca del rio Atrato, para PCH.
- Identificada la disponibilidad de recursos, se calculo el potencial de producción de hidrogeno verde.

Procesos de Producción de hidrogeno de biomasa.

La producción de hidrogeno para este proyecto, esta limitada a los procesos que utilizan las fuentes de energía renovables no convencionales (FERNC), la biomasa e hidráulica. Son fuentes de energía primaria a partir de las cuales se produce una energía secundaria, en este caso electricidad y subproductos a partir de las que se hace la conversión a hidrogeno verde.

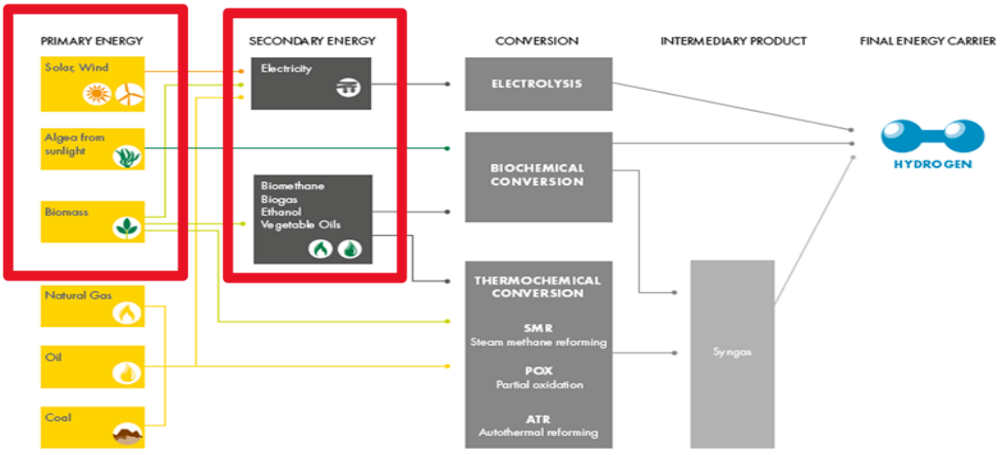


Figura 6. Procesos de producción de hidrogeno

Fuente: (Oil, 2017)

El hidrogeno verde a partir de biomasa, se separa dos rutas que dependen del cambio físico o químico realizado: Las rutas bioquímicas y termoquímicas, la primera involucran procesos biológicos y la segunda procesos termoquímicos de descomposición térmica de la biomasa a altas temperaturas y ausencia de oxígeno como lo muestra la figura 7. (CQM Consultoria SAS, 2024)

Figura 7. Rutas de producción de hidrógeno con biomasa

Fuente: (CQM Consultoria SAS, 2024)

El 96 % del H2 que se produce en el mundo se obtiene a partir de combustibles fósiles, mientras el 4 % restante por electrólisis del agua. Esta diferencia se debe, principalmente, a que el reformado de hidrocarburos es un proceso industrial ampliamente conocido y desarrollado, por tanto, menos costoso que la electrólisis. Dentro de este 96 % producido a partir de combustibles fósiles, el 50 % proviene de gas natural, el 30 % de petróleo y el 20 % de carbón. (Sabana, 2022)

Figura 8. Clasificación del hidrogeno según fuente de producción

(Sabana, 2022)

En el análisis y revisión de las experiencias, se identificaron 19 procesos de producción de hidrogeno y de estos de acuerdo con la depuración, se definió el proceso de electrolisis, la electrolisis alcalina y la electrolisis por membrana electrolítica polimérica que tienen un nivel de madurez tecnológico TRL 9. De estos dos procesos se recomienda, la electrolisis alcalina que tiene menos requerimientos para la calidad del agua, su tiempo de vida de la instalación es el doble que el proceso PEM y tiene un menor costo de capital, ver Anexo 2. CAPEX,

Los procesos de producción de hidrogeno verde de biomasa, seleccionan igualmente procesos con nivel de madure TRL9: Gasificación y reformado de biogás.

A continuación, en las tablas 2,3,4 hacemos una descripción de acuerdo con la ruta de producción de hidrogeno verde: Ruta termoquímica, ruta bioquímica y la ruta de producción por electrolisis y su nivel de madurez tecnológica para cada proceso. Las tablas 4 y 5 muestran el nivel de madurez tecnológica para la selección de los procesos que tengan un nivel de madurez TRL 9.

Tabla 2. Rutas termoquímicas de producción de H2 con Biomasa

Nombre	**Descripción**
Pirólisis	El pirólisis de la biomasa es la descomposición térmica de la biomasa en un entorno no oxidante para producir predominantemente biocarbón, líquido de pirólisis y gas de síntesis. La elección del catalizador altera la producción de hidrógeno gaseoso a diferentes temperaturas. Cuando se emplea el reformado de líquidos derivados de la biomasa, la adición de vapor o la oxidación da lugar a un reformado de vapor y produce una corriente de syngas. Informe preliminar con la lista de bienes y servicios asociados a las mejores tecnologías de producción, para la biomasa leñosa y para los residuos sólidos urbanos acondicionamiento, almacenamiento, distribución y reelectrificación de hidrógeno verde y azul.
Pirolisis reformada	En este proceso, la biomasa se somete a la pirolisis primero, donde se descompone térmicamente en un ambiente de alta temperatura y en ausencia de oxígeno, produciendo gas y líquido pirolíticos. Luego, el gas pirolítico producido en la etapa de pirolisis se somete a una etapa de reformación, en la cual se expone a una fuente de vapor de agua o dióxido de carbono en un ambiente de alta temperatura.

Gasificación	La gasificación de la biomasa para la producción de hidrógeno implica la conversión termoquímica de la biomasa (como los residuos agrícolas y forestales) a syngas, con una cantidad controlada de vapor y oxígeno, y a temperaturas superiores a ~700°C. Posteriormente, se produce una reacción de cambio de estado de agua a gas para aumentar el rendimiento y la concentración de hidrógeno.
Reformado de biogás	El biogás es mezclado con vapor en presencia de un catalizador a altas temperaturas (~750°C) y a una presión moderada para producir syngas. El biogás se obtiene a través de la digestión anaeróbica de la biomasa, por lo tanto, este método es considerado como un compuesto de producción de hidrógeno biológico y de conversión de biomasa.
Gasificación de agua supercrítica	Se ha desarrollado a escala de laboratorio para ser más robusta para el tipo de biomasa, incluida la biomasa húmeda (humedad > 35 %), como la madera y los carbohidratos. El agua requiere una temperatura superior a los 374 °C y una presión superior a los 221,2 bares para convertirse en un fluido supercrítico. En estas condiciones, la constante dieléctrica del agua disminuye, así como la cantidad de enlaces de hidrógeno. Los compuestos orgánicos y los gases son miscibles en agua supercrítica a altas temperaturas, lo que facilita su conversión, la reacción total es endotérmica.
Reformado en fase acuosa	Convierte principalmente compuestos oxigenados en hidrógeno. Las moléculas de materia prima se disuelven durante la fase acuosa y reaccionan con las moléculas de agua a bajas temperaturas (<270 °C) y altas presiones (hasta 50 bar).
Reformado con vapor	Es una reacción de purificación que mejora la composición del gas de síntesis durante la gasificación con vapor al reducir la relación de masa de carbono a hidrógeno.

Fuente: (CSIRO, 2019)

Tabla 3. Rutas Bioquímicas de producción de H2 con Biomasa

Nombre	Descripción
Fermentación oscura	En ausencia de luz, los microorganismos como las bacterias descomponen la materia orgánica para producir gas hidrogeno mediante la fermentación oscura. Las bacterias pueden modificarse para aumentar la actividad metabólica y lograr una mayor tasa de producción de hidrogeno. La fermentación oscura permite producir hidrógeno utilizando biomasa como materia prima, sin necesidad de exposición a la luz solar. Los tanques y las celdas del sistema se pueden transportar para generar hidrógeno in situ.
Fermentación híbrida clara y oscura	Los procesos de fermentación oscura y foto fermentación ocurren secuencialmente en una serie de reactores.
Nombre	**Descripción**
Fermentación oscura seguida de una digestión anaeróbica de la biomasa	La biomasa se procesa mediante fermentación oscura, seguida de digestión anaeróbica, que conduce a la producción de hidró geno y metano. El metano puede luego procesarse para producir más hidrógeno, si es nec esario, mediante procesos como la reformación o pirólisis. La digestión anaeróbica de biomasa en dos etapas presenta una oportunidad de producir metano e hidrógeno adicionales a partir de la biomasa luego de la fermentación oscura.
Foto fermentación	Los microbios fotosintéticos utilizan la luz solar para descomponer la materia orgánica mediante la fermentación. La foto fermentación podría utilizarse para producir hidrógeno a partir de aguas residuales u otros residuos orgánicos utilizando la luz solar como fuente de energía.
Biofotólisis directa e indirecta	Los microorganismos como las algas verdes y las algas verd eazuladas (cianobacterias) descomponen el agua en hidrógeno y oxígeno mediante biof otólisis directa o indirecta. En la biofotólisis directa la hidro genasa de las algas verdes impulsa la evolución del hidróge no. En la biofotólisis indirecta, la nitrogenasa de las algas verde azuladas impulsa la fijación del nitrógeno. La biofotólisis podría utilizarse para producir hidrógeno a partir de aguas residuales utilizando la luz solar como fuente de energía.

Celdas de combustible microbianas asistidas electroquímicamente	Las celdas de combustible microbianas (MFC) utilizan microorganismos como catalizadores para generar corriente eléctrica mientras oxidan donantes de electrones orgánicos o inorgánicos.
Fermentación Oscura seguida de foto fermentación	El híbrido de la fermentación oscura y la foto fermentación permite la extracción de hidrógeno adicional a partir de los efluentes del proceso típico de fermentación oscura y, por tanto, un mayor rendimiento de H2.
Nombre	**Descripción**
Fermentación oscura seguida de celda de combustible microbiana asistida electroquímicamente	Otro proceso híbrido se basa en el uso de la fermentación oscura seguida de una celda de combustible microbiano asistida electroquímicamente (EAMFC). La EAMCF puede generar más H2 a partir de los ácidos orgánicos producidos durante la fermentación oscura y así aumentar el rendimiento de H2.

Fuente: (CSIRO, 2019)

Tabla 4. Rutas de producción de H2 por Electrolisis

Nombre	**Descripción**
Electrólisis alcalina	El agua se divide en hidrogeno y oxigeno mediante la aplicación de una corriente eléctrica, utilizando un diafragma poroso y un electrolito alcalino. Tecnología desarrollada a nivel industrial
Electrólisis por membrana de intercambio aniónico (AEM)	El agua se divide en hidrogeno y oxigeno mediante la aplicación de una corriente eléctrica, utilizando un diafragma de membrana de intercambio aniónico poroso y un electrolito alcalino. Puede utilizar catalizadores más baratos que la electrolisis PEM.
Electrolisis de membrana electrolítica polimérica (PEM)	El agua se divide en hidrogeno y oxigeno mediante la aplicación de una corriente eléctrica, utilizando una membrana electrolítica de polímero solido acido. Ocupa poco espacio

Electrólisis de óxido sólido	La electrolisis de oxido solido utiliza energía térmica del calor en una combinación con energía eléctrica para sintetizar hidrogeno, utilizando una membrana electrolítica de oxido solido de cerámica. Utiliza calor 'para reducir significativamente el consumo de energía eléctrica necesario para la producción de hidrogeno.

Fuente: (CSIRO, 2019)

De acuerdo con la madures tecnológica de cada proceso, la escala nos muestra que procesos son los recomendables para este proyecto, procesos con madurez TRL 9. De acuerdo con la tabla 5.

Tabla 5. Resumen tecnologías para producir hidrógeno por Electrolisis

Nivel de madurez tecnológica - TRL									
Tecnología	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Electrólisis alcalina									
Electrolisis por membrana de intercambio aniónico (AEM)									
Electrolisis de agua asistida por carbono e hidrocarburos									
Electrolisis por membrana electrolítica polimérica (PEM)									
Electrólisis de óxido sólido									

Fuente: (CSIRO, 2019)

Tabla 6. Resumen tecnologías para producir hidrógeno a partir de biomasa.

Nivel de madurez tecnológica - TRL									
Tecnología	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
Rutas Termoquímicas									
Pirolisis									
Gasificación									
Reformado de biogás									
Gasificación de agua supercrítica									
Reformado de fase acuosa									
Reformado con vapor									

Rutas Bioquímicas									
Fermentación oscura						■	■		
Fermentación hibrida clara y oscura					■	■			
Fermentación oscura seguida de una digestión anaerobia de la biomasa				■	■				
Fotofermentación				■	■	■			
Biofotólisis directa e indirecta	■	■							
Celdas de combustible microbianas asistidas electroquímicamente		■	■	■	■				
Fermentación Oscura seguida de fotofermentación				■	■				
Fermentación oscura seguida de celda de combustible microbiana asistida electroquímicamente		■	■	■	■	■			

Fuente: (CSIRO, 2019)

Definidos los procesos con nivel de madurez TRL 9, hacemos una descripción de las cuatro tecnologías que se definieron para la producción de hidrogeno verde de biomasa y por electrolisis a partir del rio. Son tecnologías que están completamente desarrolladas y probadas en entorno real.

Procesos de Producción de Hidrogeno por Electrolisis

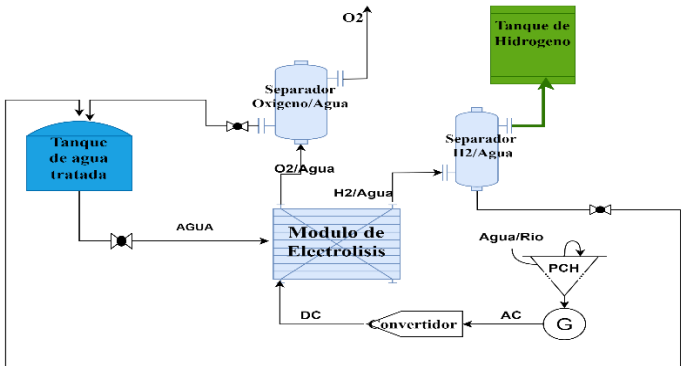


Fig.14. Diagrama de flujo producción de hidrogeno por electrolisis del agua.

Fuente: Desarrollo propio

Para producir hidrógeno (H_2) es necesario un electrolizador, que es el componente tecnológico principal en un sistema P2G (Power to Gas). Para generar H_2 se deben romper los enlaces de la molécula de agua y se debe utilizar energía eléctrica para llevar a cabo ese proceso. (Chile, 2019)

Electrólisis alcalina.

El agua se divide en hidrógeno y oxígeno mediante la aplicación de una corriente e léctrica, utilizando un diafragma poroso y un electrolito alcalino. (Biobío, 2020)

Electrólisis por membrana electrolítica polimérica (PEM).

Las moléculas de H2O se rompen y los iones H+ se transfieren a través de un electrolito de membrana polimérica. (Biobío, 2020)

Producción de hidrogeno de biomasa

Gasificación de biomasa

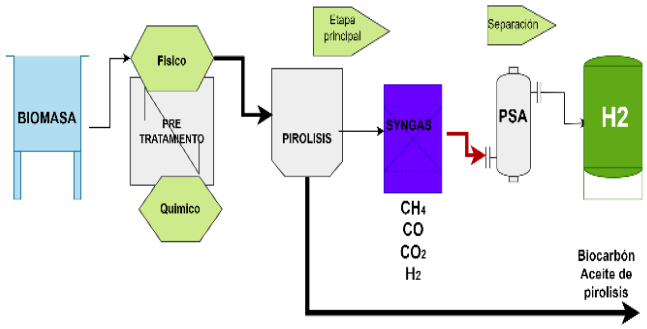


Figura 9. Proceso gasificación de biomasa

Fuente: (CQM Consultoria SAS, 2024)

La gasificación de la biomasa para la producción de hidrógeno: La conversión termoquímica de la biomasa (como los residuos agrícolas y forestales) a syngas, con una cantidad controlada de vapor y oxígeno, y a temperaturas superiores a ~700°C. Posteriormente, se produce una reacción de cambio de estado de agua a gas para aumentar el rendimiento y la concentración de hidrógeno. (CSIRO, 2019)

Reformado de biogás

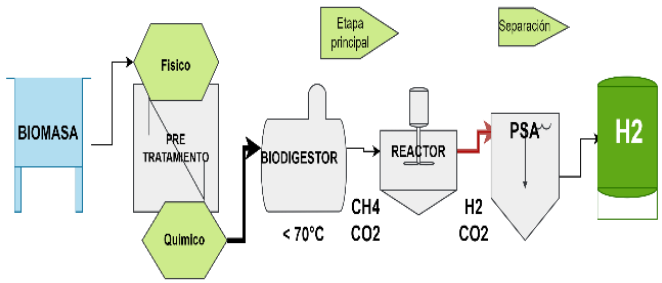


Figura 11. Proceso reformado de biogas

Fuente: (CQM Consultoria SAS, 2024)

El biogás se mezcla con vapor en presencia de un catalizador a altas tempe raturas (~750 °C) y presión moderada pa ra producir gas de síntesis. El biogás se obtiene mediante la digestión anaeróbica de la biomasa; por lo tanto, este método se considera un compuesto de producción de hidrogeno biológico y conversión de biomasa. (CSIRO, 2019)

Fuentes de energia primaria para la producción de hidrogeno verde.

Se identificarón y cuantificaron las fuentes de energia primaria presentes en la cuenca del rio Atrato y que representan el mayor potencial de generación de energia. La biomasa y el potencial hidroenergetico.

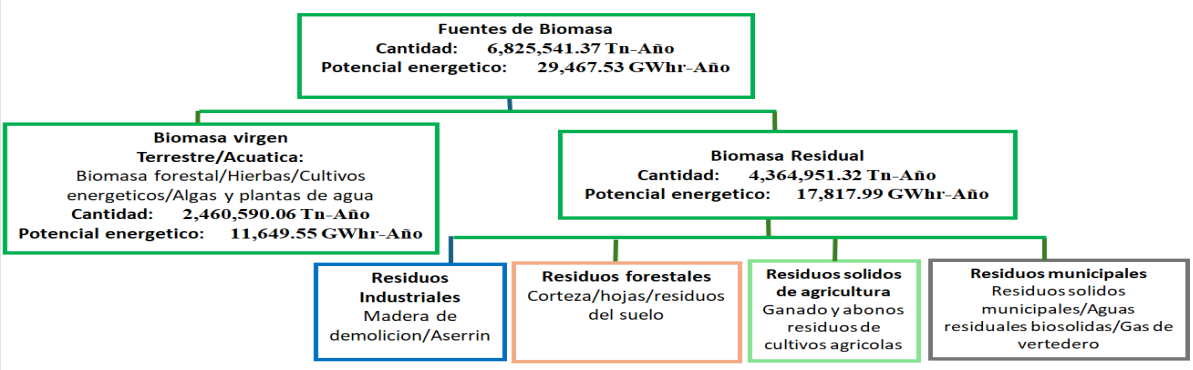


Figura 15: Fuentes de Biomasa

Fuente: Desarrollo propio

Se confirma que la cuenca del rio Atrato tiene un alto potencial de generación de energía de la biomasa17,817.99 GWhr–Año, para generar energía limpia en la región.

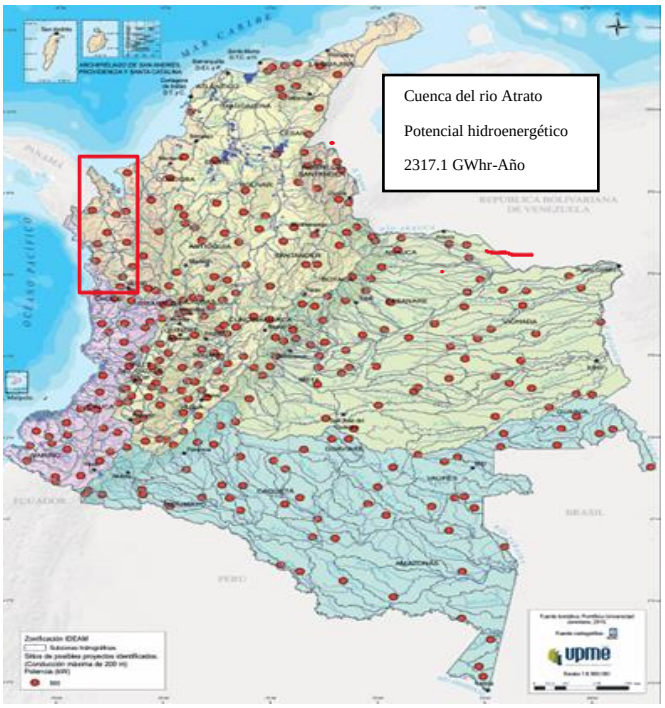


Figura 18: Potencial hidroenergetco

Fuente: (UPME, 2015)

El potencial hidroenergético de la cuenca del rio Atrato para pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) menores de 20 MW, al igual que la picocentral (< 5 KW), microcentral (<50 KW), minicentral (<500 KW), permitiría hacer uso de este potencial para la producción de hidrogeno verde por electrolisis, de acuerdo con las políticas de gobierno, alcanzando una producción de hidrogeno verde de 43719 tn/año de hidrogeno.

Hay nuevas tecnologías como la Smart hydro power, turbina monofloat, Smart free stream, smart slow flow, minicentral hidroelectrico turbolet, turbina rio balsa y turbinas kaplan, Felton, banki. Todos sistemas a filo de rio (power, 2024).

El departamento del Chocó tiene una capacidad instalada de generación de energía a partir de plantas diesel de 44,727 KW (IPSET, 2024), energia que puede ser reemplazada por hidrogeno cero emisiones.

La demanda de energía de las ZNI de Colombia es de 1,162 MWhr/día(423.4 GWhr-Año), equivalente al 18.25 % del potencial hidroenergético de la cuenca del rio Atrato para PCH (IPSET, 2024). Puede ser cubierta por hidrogeno verde.

Potencial de producción de hidrogeno verde

Identificadas las fuentes y cantidad de energia primaria en la cuanca del rio Atrato, calculamos el potencial de producción de hidrogeno verde, ver anexo 2

Tabla 7. Potencial de producción de Hidrogeno verde

Potencial de producción de Hidrogeno verde - Cuenca del rio Atrato			
Hidrogeno de Biomasa Tn/Año	**Hidrogeno por electrolisis Tn/Año**	**Total H_2 verde**	**Observaciones**
43,719	**424,236**	**467,955**	Anexo 2. Potencial producción H_2 verde

Fuente: Desarrollo propio

La cuenca del rio Atrato tiene un alto potencial para la producción de hidrogeno verde de biomasa y de la riqueza hídrica propia de la región. Esta es energía renovable para usar para la movilidad del transporte fluvial y generar energía para los procesos de generación de hidrogeno y producción de energía para la región teniendo en cuenta que gran parte de esta región no está conectada al sistema nacional de interconexión eléctrica.

Los sistemas de conversión de buques para vías navegables interiores convierten los sistemas Diesel de los buques a sistemas cero emisiones con sistema de propulsión 100% con hidrogeno. La figura 19, corresponde al buque propulsado 100 % con nitrógeno y opera entre Rotterdam en Holanda y Duisburgo en Alemania, transportando carga por el rio RHIN recorriendo una distancia de 210 km

Dimensiones del buque: 109.8 m de largo y 121.4 m de ancho y con capacidad de 109 TEUS.

Capacidad instalada: 1.2 MW (Pilas de combustible 6 x 200 KW) (Flagships, 2024).

Dimensiones: 55 m de largo

Capacidad instalada: 400 KW (Pilas de combustible 2 x 200 KW), Autonomía 7 días (Flagships, 2024)

Figura 19: Buque rio RHIN (Flagships, 2024)

Figura 20: Transporte rio Magdalena (Mintransporte, 2024)

El rio Atrato, es considerado uno de los ríos más caudalosos del mundo (hasta 5000 m3/seg), la longitud de su cauce es de 720 Km, de los cuales 560 km navegables todo el año, cuenta con una profundidad media de 11 m y un ancho promedio es de 282 m, recibe 150 ríos y 3000 quebradas (Republica, 2024). Estas características lo hacen acto para la navegación con este tipo de embarcaciones, además, del potencial de producción de hidrogeno verde son una ventaja para la navegación de las embarcaciones que utilizan combustible diésel y migren hacia el uso del hidrogeno verde para sus sistemas de propulsión.

El sistema propuesto para conversión de las embarcaciones con propulsión diesel a propulsión con hidrogeno verde: Cilindro presurizados (2 x 200 KW), 400 KW para autonomía de 7 horas y capacidad de 400 Ton, con pila de nitrógeno para generar la energía eléctrica para el accionamiento del motor.

Existe también la opción de generación de hidrogeno verde con un electrolizador instalado en el buque y suministrando directamente el hidrogeno a la pila.

Este cambio a tecnología cero emisiones con hidrogeno verde, representa no emitir a la atmosfera **1,170.6 Ton de CO2 equiv. /año**. (Factor de emisión Diesel: 10.45 Kg de CO_2 Equiv. /Galón. (Leal, 2015)).

La logística para el acopio de la biomasa debe establecer lo Siguiente:

- Fuentes de biomasa y capacidad de producción definidas.
- Evaluar el tipo de transporte para el movimiento de la biomasa y puntos de acopio.
- Definir rutas de transporte desde las fuentes de biomasa hacia los centros de acopio.
- Frecuencia de recolección y transporte de biomasa
- Involucrar a la comunidad en la recolección de biomasa para lograr empleos,
- Monitores y evaluar la eficiencia del transporte.
- Definir centros de acopio inicialmente en municipios que este por fuera del conflicto armado.

Recuperar el transporte fluvial por el rio Atrato, representa también la integración de la región Chocó, Antioquia y Eje cafetero con el resto del país haciendo uso de las ventajas que da el transporte intermodal, la comunicación de los océanos pacífico y atly ántico a través de la cuenca del rio San Juan y la cuenca del rio Atrato con el nuevo puerto de Puerto Antioquia.

Alternativas de valor social

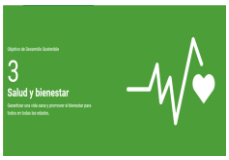
El 10 de noviembre de 2016 la Honorable Corte Constitucional profirió la Sentencia T-622 del río Atrato, basada en los derechos fundamentales al ambiente sano, al agua, la vida, la salud, entre otros (Minambiente, Rio Atrato Avanza, 2024). El rio Atrato fue declarado sujeto de derecho, debido al impacto devastador al que se ha sometido a las comunidades que habitan a lo largo del rio Atrato, sus afluentes y un fuerte deterioro del medio ambiente ocasionado por la minería ilegal, el conflicto armado, la contaminación de agua con mercurio y afectando la salud de las comunidades, que han sufrido también desplazamiento de su territorio, perdida de sus medios de vida y la cultura ancestral.

El potencial que tiene la cuenca del rio Atrato para la producción de hidrogeno verde es una oportunidad para que la comunidad retorne y recupere el territorio del que fueron desplazados, además, de sus costumbres ancestrales.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), están dirigidos a la adopción de medidas para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y garantizar que todas las personas gocen de paz y prosperidad. (ONU, 2024). La producción de hidrogeno verde a partir de biomasa y del

aprovechamiento de la riqueza hidroenergética de la región contribuyen al cumplimiento de la agenda 2030.

ODS 1, ODS 2, ODS 3, ODS 4.



El proyecto, ofrece para la comunidad a lo largo de la cuenca del rio Atrato oportunidades de empleo en la construcción de la infraestructura para el hidrogeno y su operación, infraestructura para el transporte fluvial, movimiento de carga y turismo. Esta oportunidad de empleo mejora las condiciones de salud y oportunidades para adquirir nuevos conocimientos

ODS 6. Agua limpia y saneamiento. Dotar a la comunidad de servicios de agua y alcantarillado que le permitan tener condiciones sanitarias aceptables.

ODS 7. Energía asequible y no contaminante: Tener acceso a servicios energéticos sostenibles, energía para las zonas que están por fuera del sistema de energía nacional, ZNI

ODS 8. Trabajo decente y crecimiento económico. Generación de empleo pleno y productivo y el trabajo decente.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructura. Construcción de infraestructura industrial, para apoyar el desarrollo económico y la pequeña industria.

ODS 11. Lograr que las ciudades y los asentamientos humanos sean inclusivos, seguros, resilientes y sostenibles

ODS 12. Producción y consumo responsable. Reutilización de residuos para generación de energía.

ODS 13. Acción por el clima: Combatir el cambio climático y sus efectos con procesos cero emisiones de GEI.

Fuente: (ONU, 2024)

El desarrollo de la teoría del cambio en el proyecto, determino indicadores para seguimiento durante su desarrollo y posterior a la implementación:

- Mitigación del cambio climático: Reducción de emisiones GEI. (Tn CO_2 equiv.)
- Desarrollo sostenible: Indicadores de bienestar socio económico en la región (Empleo, educación, salud, ingresos).
- Restauración de derechos: Percepción de la comunidad sobre la recuperación de sus derechos.
- Acceso a energía limpia: Numero de hogares, negocios, embarcaciones que usan energía limpia.
- Eficiencia transporte fluvial. Aumento en el movimiento de carga con hidrogeno (Tn).

CONCLUSIÓN

La producción de hidrogeno verde es una oportunidad para abordar desafíos ambientales y sociales que enfrenta la región, este proyecto contribuye a la transición energética hacia una energía más limpia y sostenible, y contribuye al desarrollo económico y social de las comunidades locales que están afectadas por la minería ilegal y el conflicto armado.

El uso de recursos orgánicos renovables y el aprovechamiento del potencial hidro energético abundante en la cuenca del rio Atrato, son soluciones basadas en la naturaleza y solución de economía circular, se convierten en alternativas viables y sostenibles que impulsan el desarrollo de la región y la conservación de los ecosistemas, con impacto directo en la mitigación del cambio climático por el uso de combustible cero emisiones.

Es un proyecto que ofrece la participación de las comunidades a lo largo de la cuenca del rio Atrato, participando a la comunidad en la planeación y diseño del proyecto asegurando que se tengan en cuenta sus necesidades, capacitando a la comunidad para los futuros empleos que generara la producción de hidrogeno, dándoles participación en el monitoreo ambiental del proyecto, beneficios económicos derivados de la generación de empleo, dándole información para crear conciencia sobre la importancia y beneficios del hidrogeno verde y su contribución con la sostenibilidad.

Es un proyecto fácilmente replicable en otras regiones que presente dificultades similares, y desarrolle proyectos para producción de hidrogeno verde.

El hidrogeno verde, tendrá una fuerte influencia en la recuperación y desarrollo del transporte fluvial sostenible, es un combustible cero emisiones, generara impacto positivo en la descarbonización de cuenca del rio Atrato, y la conversión de embarcaciones de propulsión diésel a cero emisiones por el uso del hidrogeno verde como combustible y eliminación de los derrames de combustible que contaminan las fuentes hídricas, son razones para tener en cuenta. Adicionalmente, el potencial para generación de energía abre las puertas para crear comunidades energéticas organizadas para que la comunidad pueda generar energía en las zonas que no hacen parte del sistema de interconexión eléctrica nacional, eliminando el uso de la leña y el uso de combustibles fósiles en la región.

La inversión inicial y el costo de producción del hidrógeno sigue siendo elevado en comparación con las fuentes no renovables, especialmente si se trata del hidrógeno verde. Según estimaciones del 2023**,** producir un kilo de hidrógeno gris cuesta entre US$0,98 y US$2,93; producir la misma cantidad de hidrógeno azul cuesta US$1,8 y US$4,7 y de hidrógeno verde US$4,5 y US$12 por kilo, estima que el costo de producción del verde sea de US$4 por kilo en 2030 y US$2,25 en 2040; esta reducción de precios se deberá a la transición energética que bajaría los costos de usar fuentes renovables en todos los procesos de producción. (Colorado, 2023)

Son necesarias las alianzas publico privadas en las que se integren gobierno local, gobierno nacional, banca y organismos internacionales (BID), la comunidad, y entidades como WWF y el IIAP que hacen parte de los guardianes del rio Atrato, para un desarrollo eficiente del proyecto.

Adicionalmente, la implementación del proyecto requiere la coordinación de los gobiernos locales y nacional, autoridades e instituciones nacionales y locales, sector privado, comunidad, ONG y financiación del gobierno nacional y organismos internacionales, que influyan para la solución del orden público en la región, que se ha convertido en una dificultad para realizar proyectos en la cuenca del río Atrato.

.

Referencias

Amir Ghasemi, H. R. (2024). Biomass toGreen Hydrogen.

Biobío, A. E. (2020). Manual del hidrogeno verde.

Chile, U. A. (2019). El hidrógeno como vector energetico. Pieza clave en la descontaminaciónn de la economia chilena .

Colciencias. (2016). Niveles de madurez tecnologica.

Colorado, J. C. (13 de 10 de 2023). *La Republica*. Obtenido de Hidrógeno en la transición: https://www.larepublica.co/especiales/hidrogeno en la transicion

Constitucional, C. (2016). Sentencia T622-16. Principio de precaución ambiental y su aplicación para proteger el derecho a la salud de las personas.

CQM Consultoria SAS, 2. (2024). Estudio para la implementación de proyectos de producción de hidrogeno verde, a partir de biomasa y PCH.

CSIRO. (2019). National Hydrogen Research, Development and Demonstration (RD&D) .

CSIRO. (2022). Informe de escaneo tecnológico.

Doria, A. M. (2011). Tejiendo la red - circuitos comerciales, inmigrantes sirio libaneses y empresarios nacionales en el caribe colombiano y el Atrato (1880-1930).

EIGA. (25 de 01 de 2024). *EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION* . Obtenido de EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION AISBL: https://www.eiga.eu/

El-Shafie, M. (2023). Hydrogen production by water electrolysis technologies 1-s2.0-S2590123023005534.

Energies. (2024). Cost and green hydrogen.

Flagships. (5 de 02 de 2024). *Flagships*. Obtenido de Flagships: https://flagships.eu/

IEA. (2023). *Colombia 2023.*

IEA. (05 de 11 de 2024). *IEA*. Obtenido de https://www.iea.org/: https://www.iea.org/countries/colombia/emissions

Invias, I. (2012). Análisis y propuesta socioeconómica y cultural para el canal navegable del rio Atrato.

IPSET. (07 de 2024). *Boletin datos IPSE - Julio 2024*. Obtenido de https://ipse.gov.co/

José Ramón Copa Rey, C. M.-P. (2024). Renewable Hydrogen from Biomass.

Leal, J. B. (2015). *Factores de emisión considerados en la herramienta de calculo de la huella de carbón corporativa* . Fundación natura Colombia-Corporación ambiental empresarial.

maritimecleantech. (1 de 12 de 2024). Obtenido de maritimecleantech Web site: http:/www.maritimecleantech.no

Mecides. (21 de 11 de 2024). *https://www.mecides.es/*. Obtenido de mecides: https://www.mecides.es/que-es-la-escala-trl-technology-readiness-levels/

Minambiente. (2022). Plan de Acción para la Gestión Sostenible de la biomasa residual.

Minambiente. (04 de 12 de 2024). *Rio Atrato Avanza*. Obtenido de Cuenca del río Atrato – Sentencia T622 de 2016: https://atrato.minambiente.gov.co/index.php/la-sentencia/

Mintransporte. (03 de 12 de 2024). *Ministerio de transporte*. Obtenido de Mintransporte Web site: https://mintransporte.gov.co

Oil, S. D. (2017). shell hydrogen study.

ONU. (03 de 12 de 2024). *Naciones Unidas Colombia*. Obtenido de Naciones Unidas : https://colombia.un.org/es/sdgs

power, S. h. (21 de 12 de 2024). *Smart hydro*. Obtenido de Smart hydro: https://www.smart-hydro.de

Republica, B. d. (2 de 12 de 2024). *Banrepcultural-la enciclopedia*. Obtenido de Banrepcultural: https://enciclopedia.banrepcultural.org

Sabana, U. d. (2022). Recomendaciones para el desarrollo de la economia del hidrogeno en Colombia.

Superservicios. (2022). *Residuos solidos 2022*. Obtenido de https://www.superservicios.gov.co/

UPME. (2008). Atlas del potencial energético departamental de biomasa residual en Colombia.

UPME. (2015). Evaluación del potencial hidroenergetico de colombia.

UPRA. (2024). *UPRA.Perfiles departamentales*. Obtenido de https://upra.gov.co/es-co

ANEXOS. Cálculos.

ANEXO 1. Tipos de biomasa – Potencial energético de la biomasa

BIOMASA VIRGEN				Cantidad Tn/año	Poder calorico Kwhr/kg	Kg biomasa/Kg de H2	Poder calorico Kwhr/Tn	KWhr/Año	GWhr/año
BIOMASA TERRESTRE	Hierbas: materia orgánica generada por plantas herbáceas o hierbas (no leñoso)	Anuales, bienales o perenne	Hojarasca	2,460,590.06	4.73	14.08	4,734.45	11,649,546,907.58	11,649.55
	Cultivos energéticos: Se produce a partir de especies vegetales que se cultivan para producir energía	Cultivo de caña de azúcar únicamente para ser convertido en biomasa	Palma de aceite						
	Cultivos agrícolas: Se da a través de los extractivos agrícolas, son los excedentes que por distintos motivos no sirven para ser consumidos	Bagazo de caña de azúcar	Caña panelera (Bagazo)						
BIOMASA ACUATICA	Algas: Material vegetal proveniente de ríos o mares	Chlorella, Usada para producir biocombustible							
	Plantas de Agua - Maleza acuatica: Material vegetal proveniente de ríos o mares	Eichhornia crassipes (Jacinto de agua - Buchon de agua)							
Total biomasa virgen				2,460,590.06	4.73	14.08	4,734.45	11,649,546,907.58	11,649.55

BIOMASA RESIDUAL				Cantidad Tn/año	Poder calorico Kwhr/kg	Kg biomasa/Kg de H2	KWhr/Tn	KW/año	GWhr/año
RESIDUOS MUNICIPALES	los residuos sólidos generados por actividades domésticas, comerciales e industriales en áreas urbanas	Restos de alimentos, papel, cartón, entre otros	Residuos solidos urbanos	4,350,755.32	3.69	18.10	3,693.33	15,347,795,359.09	
	sólidos orgánicos biológicos que se generan como subproducto del tratamiento de las aguas residuales municipales e industriales	Agua proveniente de PTAR	Lodos de PTAR						
	gases que se generan en vertederos como subproducto de la descomposición anaeróbica de los residuos sólidos orgánicos presentes en ellos	Gas producido en los vertederos de residuos							
RESIDUOS SOLIDOS DE AGRICULTURA	Biomasa del ganado Residuos de cultivos agrícolas: Restos de cultivo que quedan después de las cosechas	Estiercol, desperdicio de alimenmtos Tallos, hojas, entre otros	Arroz, maiz, platano, cacao, yuca, banano, coco, borojo, chontaduro						
RESIDUOS FORESTALES	Corteza, hojas y residuos del suelo: Incluye restos de árboles y arbustos que quedan después de actividades de manejo forestal	Poda y tala de árboles							
RESIDUOS INDUSTRIALES	Madera de demolición, aserrín: Incluye la madera de demolición o procesos con la madera	Residuos de demolición de estructuras con madera	Residuos de madera/aserrin						
	Aceite/grasas usadas: Proviene de grasas y aceites usados.	Aceite de cocina usado							
Total biomasa residual				4,364,951.32	3.69	18.10	3,527.62	17,817,985,337.72	17,817.99
TOTAL BIOMASA (Virgen y Residual)				6,825,541.37		16.09		29,467,532,245.30	29,467.53

Fuente: Desarrollo propio

- **Biomasa residual agrícola.**

Area sembrada (ha)		Producción Ton Producto / año	Cantidad de residuo Ton/año	Potecial energetico Kwhr/año	Factor residuos	Factor rendimiento	Poder calorifico kw hr/kg
Arroz	23,975.0	43,279.8	110,364.1	430,929,244.31	2.55	1.81	3.90
Café	295.0	209.0	1,122.0	5,685,182.58	5.37	0.71	5.07
Caña panelera	5,000.0	82,557.2	518,457.9	2,440,949,640.62	6.28	16.51	4.71
Maiz	6,443.0	10,657.5	15,080.2	65,352,802.27	1.41	1.65	4.33
Palma de aceite	140.0	910.0	1,732.2	8,246,504.20	1.90	6.50	4.76
Platano	31,451.0	187,515.9	1,153,225.3	2,574,618,929.65	6.15	5.96	2.23
Cacao	7,240.0	11,975.8	16,945.6	66,426,867.12	1.41	1.65	3.92
Yuca	7,011.0	11,597.0	16,409.6	64,325,796.32	1.41	1.65	3.92
Banano	4,000.0	23,848.6	146,669.5	327,445,096.14	6.15	5.96	2.23
Coco	3,300.0	5,458.6	7,723.8	30,277,439.43	1.41	1.65	3.92
Borojo	2,243.0	3,710.2	5,249.9	20,579,483.83	1.41	1.65	3.92
Chontaduro	1,468.0	2,428.2	3,435.9	13,468,873.06	1.41	1.65	3.92
Total	**92,566.0**	**384,147.8**	**1,996,416.1**	**6,048,305,859.5**	**36.9**		**3.9**

Fuente: (UPRA, 2024)

- **Biomasa residual sector pecuario.**

Población Cabezas/año		Cantidad estiercol Ton / año	Estiercol/dia	Potecial energetico Kw hr/año	Poder calorifico Kwhr/kg
Bovinos	179,631.0	2,065,307.4	31.5	7,076,014,342.4	3.43
Porcinos	13,498.0	49,267.7	10	195,999,620.4	3.98
Equinos	10,171.0	85,385.5	23	292,872,419.4	3.43
Bufanilos	1,537.0	17,671.7	31.5	60,613,785.2	3.43
Ovinos	929.0	542.5	1.6	1,860,898.5	3.43
Caprinos	76.0	44.4	1.6	152,237.1	3.43
Total	**205,842.0**	**2,218,219.2**		**7,627,513,302.9**	**3.5**

Fuente: (UPRA, 2024)

- **Residuos sólidos urbanos.**

Cantidad de residuos Tn/dia	Cantidad de residuos Tn/año	Cantidad de residuos Kg/año	Potecial energetico Kw hr /año	Potecial energetico MWhr/año	Poder calorico Kwhr/kg	Poder calorico Kcal/Kg
369.33	134,805.45	134,805,450.00	591,366,118.97	591,366.12	4.39	3,772.00

Fuente: (Superservicios, 2022)

ANEXO 2. Potencial hidroenergético – Potencial de producción de hidrogeno verde

Tipo de generación de energia	Cantidad	Potencia-KW	Total Potencial hidroenergetico	
			KW	MW
Pico Centrales (5KW)	12.0	5.0	60.00	0.06
Micro centrales (50 KW)	9.00	50.0	450.00	0.45
Minicentrales (500 KW)	8.00	500.0	4,000.00	4.00
Pequeñas centrales (20 MW)	13.00	20,000.0	260,000.00	260.00
	30.00	20,550.00	264,510.00	264.51
Potencial de energia generada por hora			0.26	GWhr
Potencial de energia generada por año			2,317.11	GWhr - Año

En función de su capacidad:

Picocentrales: Entre 0,5 y 5 kW, operación a filo de agua.

Microcentrales: Entre 5 y 50 kW, operación a filo de agua.

Minicentrales: Entre 50 y 500 kW, operación a filo de agua.

Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH): Entre 500 y 20.000 kW, operación a filo de agua. (UPME, 2015)

Tecnologías para picocentrales, microcentrales y minicentrales: Smart hydro power, turbina monofloat, Smart free stream, smart slow flow, minicentral hidroeléctrica turbolet, turbina rio balsa (power, 2024)

Para las PCH, la eficiencia de la depende del tipo de turbina seleccionada.

- **Potencial de producción de hidrógeno verde**.

Potencial de producción de hidrogeno verde por electrolisis Energia generada a partir del potencial hidroenergetico			
Potencial hidroenergetico		Electrolisis Alcalina	Producción H2 - Año
GWhr -Año	KWhr	Kw hr/kg	Tn-Año
2,317.11	2,317,107,600.0	53.0	43,719.0

Potencial de producción de hidrogeno verde de Biomasda			
Biomasa		Eficiencia	Producción H2
Tn/año	Tn/hr	Kg Biomasa/kg de hidrogeno	Tn-Año
6,825,541.4	779.2	16.09	424,236.39

Fuente: Desarrollo propio

ANEXO 3. CAPEX

- **CAPEX – Producción de hidrogeno de biomasa**

Tecnologia	Costo de capital/ton H_2	Costo de capital/ton H_2 Otros procesos
	USD$/ton H2	USD$/ton H2
Gasificación	2,679.0	
Pirolisis		3,729.0
Reformado de biogas		2,356.0
PSA - Adsoción por cambio de presión	253.7	
WGS - Water Gas Shif	108.7	
BWGS - Desplazamiento agua gas biologico		5,909.1
HB - HB producción de amoniaco		3,253.8
FT - FT Producción de metanol		1,784.3
Cryocap - Captura de dioxido de carbóno	146.5	
Tratamiento de agua		
Compresión y envasado	667.2	
Secado y Cribado	30.0	
Bahia		521,038.0
	3,885.02	

Fuente: (CQM Consultoria SAS, 2024)

- **CAPEX – Tratamiento de agua.**

Tecnologia	Costo de capital USD$	Ton H_2/dia	$/Ton H_2
Proceso tratamiento de agua - CFSLCA	1.921,08	2.28	840,81
Resina de intercambio ionico	5,000.00	2.02	2.480,16
Destilación	35,402.51	2.02	17.560,7

Fuente: (CQM Consultoria SAS, 2024)

- **CAPEX – Producción de hidrogeno por electrolisis.**

Parametro		PEM	ALK
Eficiencia	%	50-83	50-78
Tiempo de vida instalación	Horas	50,000	<100,000
Temperatura	°C	50 - 90	60 -100
Rango de presión	Bar	<70	25-30
Pureza del hidrogeno	%Volumen	99.999	99.3-99.9
CAPEX	**EUR$/KW**	**1100-1800**	**500-1400**
OPEX	**EUR$/Kg H_2**	**5.29-5.37**	

Fuente: (Energies, 2024)