



**UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA INGENIERÍA EN PETRÓLEOS**

TEMA:

**“PRODUCCIÓN DE ECOÁRIDOS A PARTIR DE DIÓXIDO DE
CARBONO CAPTURADO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA
REFINERÍA LA LIBERTAD MEDIANTE PRUEBAS DE
LABORATORIO”**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

FRANCISCO JAVIER BURGOS

TUTOR:

ING. ADRIANA GABRIELA MORALES DELGADO

LA LIBERTAD - ECUADOR

2024

UNIVERSIDAD ESTATAL PENÍNSULA DE SANTA ELENA

**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA EN PETRÓLEOS**

TEMA:

**PRODUCCIÓN DE ECOÁRIDOS A PARTIR DE DIÓXIDO
DE CARBONO CAPTURADO DE PROCESOS
INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD
MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO**

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

AUTOR:

FRANCISCO JAVIER BURGOS

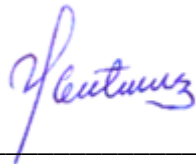
TUTOR:

ING. ADRIANA GABRIELA MORALES DELGADO

LA LIBERTAD – ECUADOR

2024

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



Ing. Marlleis Gutiérrez H., PhD.

DIRECTOR DE CARRERA



Firmado electrónicamente por:
ADRIANA GABRIELA
MORALES DELGADO

Ing. Adriana Morales D., MSc.

DOCENTE TUTOR



Ing. José Villegas S., MSc.

DOCENTE ESPECIALISTA



Ing. Carlos Malavé C., Msc.

DOCENTE GUÍA DE LA UIC



Ing. David Vega González

SECRETARIO DEL TRIBUNAL

DEDICATORIA

Dedicado a mi madre.

CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO

En calidad de tutor del trabajo de investigación para titulación del tema “**PRODUCCIÓN DE ECOÁRIDOS A PARTIR DE DIÓXIDO DE CARBONO CAPTURADO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO**” elaborado por el estudiante **Francisco Javier Burgos**, egresado de la carrera de Ingeniería en petróleos, de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, me permito declarar que una vez analizado en el sistema antiplagio COMPILATIO, luego de haber cumplido con los requerimientos exigidos de valoración, la presente tesis, se encuentra con un **6%** de la valoración permitida.



Ing. Adriana Gabriela Morales Delgado

Tutor

C.I: 0924264039

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, FRANCISCO JAVIER BURGOS, declaro bajo juramento que el presente trabajo de titulación denominado “PRODUCCIÓN DE ECOÁRIDOS A PARTIR DE DIÓXIDO DE CARBONO CAPTURADO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO”, no tiene antecedentes de haber sido elaborado en la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Carrera de Ingeniería en petróleos, lo cual es un trabajo exclusivamente inédito y perteneciente de mi autoría.

Por medio de la presente declaración cedo los derechos de autoría y propiedad intelectual, correspondientes a este trabajo, a la Universidad Estatal Península de Santa Elena, según lo establecido por la ley de propiedad intelectual, por su reglamento y por la normativa institucional vigente.

Atentamente,

A handwritten signature in black ink, reading "Francisco Javier Burgos". The signature is written in a cursive style and is positioned above a horizontal line.

Francisco Javier Burgos

Autor de Tesis

Pasaporte: FB562302

CERTIFICACIÓN DEL TUTOR

Ing. Adriana Gabriela Morales Delgado

TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

Universidad Estatal Península de Santa Elena

En mi calidad de Tutor del presente trabajo **PRODUCCIÓN DE ECOÁRIDOS A PARTIR DE DIÓXIDO DE CARBONO CAPTURADO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO** previo a la obtención del Título de Ingeniero en petróleos elaborado por el Sr. Francisco Javier Burgos, egresado de la carrera de petróleos, Facultad Ciencias de la Ingeniería de la Universidad Estatal Península de Santa Elena, me permito declarar que luego de haber orientado, estudiado y revisado, la apruebo en todas sus partes.



Firmado electrónicamente por:
ADRIANA GABRIELA
MORALES DELGADO

Ing. Adriana Gabriela Morales Delgado

TUTOR

CERTIFICADO DE GRAMATÓLOGIA

Ing. Flor Estefanía Rodríguez Balón, MSc.

Celular: 0963140641

Correo: flor.rodriguez@educacion.gob.ec

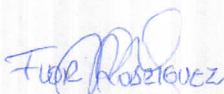
CERTIFICACIÓN GRAMATICAL Y ORTOGRÁFICA

Yo, **FLOR ESTEFANÍA RODRÍGUEZ BALÓN**, en mi calidad de **INGENIERA EN SISTEMAS Y MASTER EN GESTIÓN EDUCATIVA**, por medio de la presente tengo a bien indicar que he leído y corregido el trabajo de integración curricular previo a la obtención del título de ingeniero en petróleos, denominado **“PRODUCCIÓN DE ECOÁRIDOS A PARTIR DE DIÓXIDO DE CARBONO CAPTURADO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA REFINERÍA LA LIBERTAD MEDIANTE PRUEBAS DE LABORATORIO.”** del estudiante: **FRANCISCO JAVIER BURGOS**.

Certifico que está redactado con el correcto manejo del lenguaje, claridad en las expresiones, coherencia en los conceptos e interpretaciones, adecuado empleo en la sinonimia. Además de haber sido escrito de acuerdo con las normas de ortografía y sintaxis vigentes.

Es cuanto puedo decir en honor a la verdad y autorizo a los interesados hacer uso del presente como estime conveniente.

Santa Elena, 17 de diciembre del 2023



Ing. Flor Estefanía Rodríguez Balón, MSc.

CI. 2400001976

INGENIERA EN SISTEMAS

MASTER EN GESTIÓN EDUCATIVA

Nº DE REGISTRO DE SENEYCYT 5582208965

AGRADECIMIENTOS

Agradezco con cariño a mi madre quien me apoyó todo este tiempo, el pilar de mi camino, con su arduo sacrificio me brindo el cobijo ante las grandes dificultades que he sobrepasado estos años, tiempo en que he perdido tanto y más a mí mismo, depositó en mí su fe y sus esperanzas, por ello estaré siempre en deuda.

Siempre he de recordar a quien creyó primero en mí, y sus palabras me impulsaron a forjar la convicción, que hoy tengo sobre la capacidad de cumplir mis metas, ingeniero René Pierre, un gran maestro y amigo, gracias.

A los grandes ojos bellos que en su tiempo iluminaron mi vida, que sea aquella luz que en ellos portas lo que te permita ver más allá de todo el daño que cause.

A quien me mostró la vida de un manera distinta, llenándola de magia por breves instantes, a costa de su propio dolor y soledad, te llevaré por siempre en mi corazón.

A las persona que arruino mi vida estos últimos cuatro años, y que en su castigo vio reflejado el daño que me causó, deseo que encuentres la paz y tal vez te permitas comprender que significa el perdón.

A quien inició todo, quien me inculpó y puso a todos en mi contra, tendrás destino cierto, ahogándote en tu propio infierno, fui tu único amigo, se bien que seré el último. Nada de lo que hiciste pudo detenerme.

Ten el valor de reconocer que hay cosas que no puedes cambiar, pero ten también valor, para cambiar aquellas cosas que si puedes.

Francisco

CONTENIDO

	Pág.
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN	iii
DEDICATORIA.....	iv
CERTIFICADO DE ANTIPLAGIO	v
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	vi
CERTIFICACIÓN DEL TUTOR.....	vii
CERTIFICADO DE GRAMATOLOGÍA.....	viii
AGRADECIMIENTOS.....	ix
LISTA DE FIGURAS	xv
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN.....	19
1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	21
1.2. ANTECEDENTES	22
1.3. HIPÓTESIS	23
1.4. OBJETIVOS.....	23
1.4.1. Objetivo General.....	23
1.4.2. Objetivos Específicos	23

1.5.	ALCANCE	23
1.6.	VARIABLES.....	24
1.6.1.	Variables Dependientes:	24
1.6.2.	Variables Independientes:.....	24
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....		25
2.1.	Relevancia económica y ambiental de la industria petrolera del Ecuador	25
2.1.1.	Demanda energética primaria y secundaria en Ecuador.....	25
2.1.2.	Emisiones durante la refinación	26
2.1.3	Efectos ambientales de la refinación de crudo en el cantón La Libertad	27
2.2.	Criterios de sostenibilidad en la industria petrolera del Ecuador	28
2.2.1.	Economía circular.....	28
2.2.2.	Desafíos ambientales y sociales	29
2.2.3.	Plan nacional de adaptación al cambio climático del Ecuador.....	29
2.2.4.	Plan de desarrollo empresarial de EP PETROECUADOR 2021-2025	29
2.3.	Ecoáridos implementados a la industria petrolera	30
2.3.1.	Carbonatación acelerada.....	31
2.3.2.	Ecoáridos y su potencial en la industria petrolera	31
2.4.1.	Residuos de construcción y demolición	32

2.4.2. RDC en economía circular	33
2.4.3. Argamasa	34
2.4.4. RCD en el cantón la Libertad	34
2.5. Dióxido de carbono	38
2.6. Métodos de captura de dióxido de carbono	38
2.6.1. Métodos de captura y almacenamiento de dióxido de carbono.....	38
2.6.2. Absorción natural de dióxido de carbono.....	39
2.6.3. Captura de CO ₂ durante la refinación de crudo.....	39
2.6.4. Métodos de almacenamiento de dióxido de carbono.....	40
2.7. Mineralización de dióxido de carbono	41
2.7.1. Método de mineralización de dióxido de carbono.....	41
2.7.2. Método de carbonatación acelerada en hormigón	41
2.8. Equipos, herramientas e insumos necesarios.....	42
2.8.1. Equipos	42
2.8.2. Materias primas y herramientas.....	43
2.9. Procedimiento de fabricación ecoáridos por carbonatación acelerada	43
2.9.1. Método de carbonatación aplicada al CO ₂ atmosférico.....	43
2.10. Formula química general de un ecoárido	44

CAPITULO III: METODOLOGÍA.....	45
3.1. Método de investigación.....	45
3.2 Tipo de estudio	45
3.3 Población	46
3.4 Muestra	46
3.5 Equipos y materiales.....	46
3.6 Toma y recolección de muestras	46
3.6.1 Muestras recolectadas.....	47
3.7 Dióxido de carbono y RCD	48
3.7.1 Cantidades de CO ₂ producidos y capturados en la refinería La Libertad.....	48
3.8 Método de carbonatación acelerada por formación de capa carbonatada	49
3.8.1. Anhidrido carbónico en la atmosfera.....	50
3.8.2. Valores de CO ₂ absorbido.....	50
3.8.3 Cálculo de concentraciones de CO ₂ en ecoáridos.....	50
3.8.4 Preparación de muestras de RCD recolectados	52
3.8.5 Aditivar muestras de ecoáridos con CO ₂	55
CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	59
4.1.1 Absorción de dióxido de carbono.....	59

4.1.2 Discusión y observación.....	60
4.1.2 Material carbonatable	61
4.2 Pruebas de laboratorio	61
4.2.3 Pruebas de calcimetría por método químico.....	61
4.3 Método de ácido clorhídrico.....	61
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1, Emisiones de GEI por actividad (%). Fuente(MEM, 2022).	26
Figura 2, Emisiones de una refinería en operación. Fuente:(Expansion, 2022)	27
Figura 3, Economía circular. Fuente:(Tendencias creativas, 2022)	28
Figura 4. Cadena de procesos a macro escala. Fuente: (OCO Technology, 2021)	30
Figura 5. Mapa de procesos generales de carbonatación de áridos residuales. Fuente (OCO Technology, 2021)	32
Figura 6, Residuos de construcción. Fuente:(FUSO, 2020)	33
Figura 7, Escombros -Barrio las acacias. Fuente: Autoría propia	35
Figura 8, Escombros, zonas cercanas a la Refinería La Libertad. Fuente: Autoría propia	36
Figura 9 Zona con pocos RCD. Fuente: Autoría propia	36
Figura 10, Bultos de cemento rellenos con RCD. Fuente Autoría propia	37
Figura 11. Proceso de separación de CO2 del gas, Fuente:(Perez, 2019)	40
Figura 12. Metodología de la investigación aplicada.	45
Figura 13, Muestras recolectadas.	47
Figura 14, Muestras de cemento para pruebas de carbonatación en cilindros	47
Figura 15, Muestras de RCD siendo pulverizados	52
Figura 16, Tamizaje y probeta con agua	53
Figura 17 Preparación de la probeta cilíndrica con el cemento de muestra ideal	54
Figura 18, Muestra pulverizada e hidratada, obtenida de las muestras ideales previamente hechas	55
Figura 19, Cámara provisional de carbonatación acelerada	56
Figura 20, Pipeta de CO2 y válvula.	57
Figura 21, bicarbonato de calcio	58
Figura 22, Muestras carbonatadas	60
Figura 23, Liberación de CO2 en balanza analítica	62

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Equipos y materiales _____	46
Tabla 2. Cantidad de emisiones de gases. Fuente:(IPC, 2007) _____	48
Tabla 3. RCD producidos a nivel inter-cantonal. Fuente:(María Fernanda Solíz Torres et al., 2020) ____	48
Tabla 4 Cálculos teóricos de volumen y dióxido de carbono absorbido. _____	51
Tabla 5, Resultado de dióxido de carbono absorbido en las muestras de RCD _____	59

“PRODUCCIÓN DE ECOÁRIDOS A PARTIR DE DIÓXIDO DE
CARBONO CAPTURADO DE PROCESOS INDUSTRIALES DE LA
REFINERÍA LA LIBERTAD MEDIANTE PRUEBAS DE
LABORATORIO”

Autor: Burgos Francisco Javier

Tutor: Morales Delgado Adriana Gabriela

RESUMEN

En el presente trabajo se probó que la elaboración de ecoáridos con dióxido de carbono capturado de procesos industriales de la refinería “La Libertad” a través del método de carbonatación acelerada aplicada a áridos residuales obtenidos de escombros en vía pública es posible.

El método de carbonatación acelerada es rápido y eficaz, al ser aplicado en sólidos reactivos con alto contenido de cal u óxido de calcio se obtiene bicarbonato de calcio, el cual puede ser usado como material de construcción. Esto se convierte a su vez en una herramienta de economía circular y sostenible.

PALABRAS CLAVE: ECOÁRIDOS, DESCARBONIZACIÓN, DIÓXIDO DE
CARBONO NEGATIVO, REFINERÍA LA LIBERTAD

“PRODUCTION OF ECO-AGGREGATES FROM CARBON DIOXIDE
CAPTURED FROM INDUSTRIAL PROCESSES OF LA LIBERTAD
REFINERY THROUGH LABORATORY TESTING”

Autor: Burgos Francisco Javier

Tutor: Morales Delgado Adriana Gabriela

ABSTRACT

In this study, it was demonstrated that the production of eco-aggregates using carbon dioxide captured from industrial processes at the "La Libertad" refinery, through the method of accelerated carbonation applied to residual aggregates obtained from debris on public roads, is feasible.

The accelerated carbonation method is rapid and effective. When applied to reactive solids with a high lime content or calcium oxide, calcium bicarbonate is obtained, which can be used as a construction material. This, in turn, becomes a tool for circular and sustainable economy.

KEYWORDS: ECO-AGGREGATES, DESCARBONIZATION, NEGATIVE
CARBON DIOXIDE, LA LIBERTAD REFINERY

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas el cambio climático se ha convertido en uno de los desafíos más apremiantes en el mundo, y a medida que las consecuencias del cambio climático se vuelven más evidentes, se hace imprescindible la búsqueda de soluciones sostenibles y efectivas.

Las Naciones Unidas reconocen que el cambio climático es una preocupación común de toda la humanidad, ya que las actividades humanas son las que están aumentando sustancialmente las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera (García, 2016).

Este trabajo busca comprobar un método ya establecido sobre carbonatación acelerada, abordando algunos de los grandes problemas medioambientales que la sociedad enfrenta, como el cambio climático, la gestión de residuos de construcción y la emisión de dióxido de carbono (CO₂).

Los ecoáridos son una mezcla de áridos residuales, agua y dióxido de carbono. Su producción implica el uso de CO₂ capturado en el proceso de refinación, y áridos residuales provenientes de desechos de construcción y demolición. Estos residuos se reutilizan, transformándolos en una nueva materia prima que se reincorpora a los procesos de producción (Repsol, 2021).

La reducción de emisión de GEI es un objetivo de sostenibilidad ambiental, ya que las industrias de refinación de crudo y fabricación áridos son las que más GEI liberan a la atmosfera (Quiroz, 2016).

La revalorización de residuos de construcción mediante su reconversión en materiales de construcción ecológicos los convierte en una alternativa eficiente, gracias a que su producción genera un significativo ahorro en energía, comparado con la producción de nuevos áridos además de su bajo coste en materias primas (Herrero-Hechavarría et al., 2016).

En el cantón La Libertad, provincia de Santa Elena está La refinería “La Libertad”, la cual requiere de grandes cantidades de gas para procesar petróleo (crudo), en la obtención de derivados, liberando CO₂ en el proceso de combustión (Perero, 2016).

Los residuos de construcción, también conocidos como escombros o RCD (Residuos de Construcción y Demolición), son una preocupación ambiental importante en el cantón de La Libertad. Estos RCD producidos podrían ser usados con fines sostenibles. Además, teniendo en cuenta que están clasificados como residuo tóxico en el acuerdo ministerial 142, por lo cual su reciclaje es de un valor ambiental representativo (Carrasco, 2018).

La producción de ecoáridos consiste en aplicar un proceso llamado Carbonatación Acelerada (uso de CO₂) como método de curado, lo cual contribuye a la reducción de la huella de carbono y mitiga el daño ambiental, posicionándose como una herramienta de economía circular y sostenible acorde a la agenda 2050 de la ONU (Repsol, 2021).

1.1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

La península de Santa Elena es una zona explotación hidrocarburífera que cuenta a su vez con una refinería “La Libertad”, donde se procesa el petróleo para obtener distintos derivados. Es durante esta operación que se queman grandes cantidades de gas para alimentar los hornos y se emana dióxido de carbono producto de la combustión (Soriano, 2017).

El dióxido de carbono tiene fuertes incidencias medioambientales, siendo el principal gas de efecto invernadero, por normativa se lleva a cabo la captura antes, durante o después de un proceso que implique su emisión, de esto surgen incertidumbres de qué hacer con el dióxido de carbono capturado (EPA, 2017).

El método más común es utilizar el CO₂ en EOR (por sus siglas en inglés, Enhanced Oil Recovery) o almacenarlo en yacimientos depletados e incluso en acuíferos de agua salina, aunque es una solución aceptada, se ha planteado hacer uso del CO₂ como materia prima, ya que no siempre se requiere inyectar pozos o no hay un depósito natural cercano (BBVA, 2021).

No hay estudios de métodos alternativos en la península de Santa Elena con fines de uso del dióxido de carbono como materia prima, puede que existan investigaciones de carácter privado por antiguas o actuales empresas interesadas en este gas bajo términos de la misma finalidad de este trabajo.

Considerando que no haya un estudio acerca del dióxido de carbono y su uso como materia prima aplicado a áridos reciclados, se realiza la comprobación de un método probado.

1.2. ANTECEDENTES

En la mineralización de dióxido de carbono mediante carbonatación de residuos térmicos, ha sido probado que las cenizas de incineración APC (de sus siglas en inglés, Air Pollution Control), son un residuo térmico que constituye una fuente de material alcalino requerido para el potencial secuestro del CO₂, emitido a la atmósfera por actividades industriales (Sarasola & Caballero, 2012).

La revalorización de residuos industriales mediante su reconversión en materiales de construcción, que sean capaces de competir en el mercado gracias a su ahorro en energía y costes de las materias primas, estando alineada al desarrollo sostenible de la agenda 2030 de la ONU (Hermida, 2020).

Un proyecto estratégico en el cual participan la Fundación de Innovación, Repsol y Petronor bajo el acrónimo de “AggregaCO2”, refiere a una solución de interés empresarial y social usando el principal gas de efecto invernadero, el dióxido de carbono, mediante un proceso llamado carbonatación acelerada, la cual es usada en áridos residuales para la obtención de ecoáridos (Repsol, 2021).

El proyecto AggregaCO2 tiene como objetivo revolucionar la industria de los agregados, mediante la exitosa implementación comercial de un agregado sostenible como una alternativa sólida a los agregados convencionales que no son completamente respetuosos con el medio ambiente (Innovation found, 2021).

El “Plan Empresarial” de EP PETROECUADOR (2021-2025) acerca de los compromisos con la descarbonización, busca reducir las emisiones de GEI por barril de petróleo extraído, transportado, procesado y distribuido por la EP PETROECUADOR, incluyendo criterios de sostenibilidad (Petroecuador, 2023).

1.3. HIPÓTESIS

Producir ecoáridos en laboratorio usando dióxido de carbono capturado de los procesos industriales en la refinería La Libertad es una alternativa de economía circular aplicable y sostenible.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. Objetivo General

- Comprobar la posibilidad de producción de ecoáridos en laboratorio, utilizando el dióxido de carbono capturado en la refinería La Libertad.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Analizar la cantidad de CO₂ capturada en el proceso de refinación de petróleo disponible para su utilización.
- Analizar las cantidades de RCD producidos en el cantón La Libertad.
- Comprobar el método de carbonatación acelerada en RCD con CO₂ capturado en la refinería La Libertad para la obtención de ecoáridos.

1.5. ALCANCE

La siguiente propuesta contempla la comprobación de la obtención de ecoáridos en laboratorio, utilizando el dióxido de carbono capturado de los procesos industriales de la refinería La Libertad.

1.6. VARIABLES

1.6.1. Variables Dependientes:

- Cantidad y calidad de ecoáridos resultantes producidos.

1.6.2. Variables Independientes:

- Cantidad de CO₂ capturado disponible.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Relevancia económica y ambiental de la industria petrolera del Ecuador

La situación energética de Ecuador confirma la necesidad de implementar proyectos de eficiencia energética a gran escala. Se lleva a cabo un análisis de la influencia de cada uno de estos proyectos en función de la proyección obtenida.

Además, se evalúa cómo cada proyecto podría afectar la demanda energética al considerar el uso final que involucra. Asimismo, se estudia el impacto de estos proyectos en la captura y las emisiones de CO₂ que se liberan al medio ambiente (Salazar & Panchi, 2014).

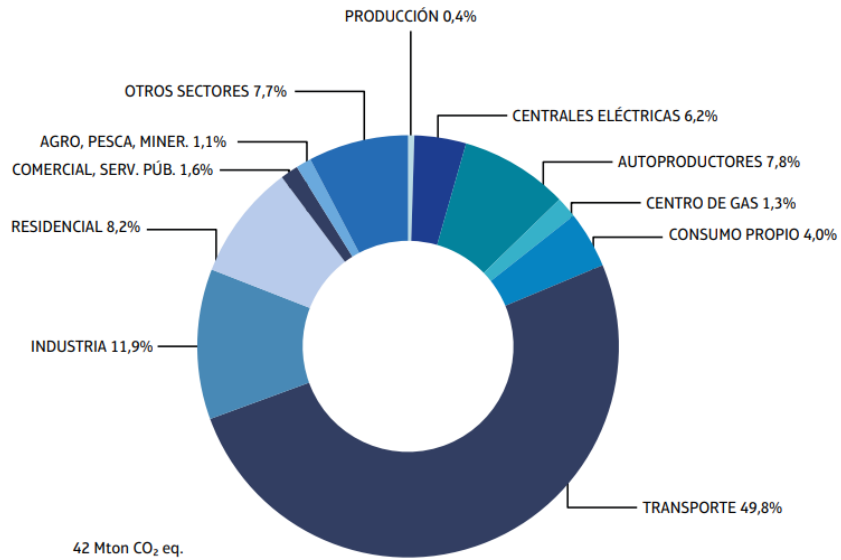
2.1.1. Demanda energética primaria y secundaria en Ecuador

La demanda primaria en Ecuador se compone principalmente por petróleo, gas e hidroenergía, secundado por derivados del petróleo y energía producida en centrales eléctricas, todas derivan en producción de CO₂.

El incremento de la población aumenta la demanda energética en el país y en relación con los efectos climáticos adversos que limitan la oferta, el suministro energético es ineficiente, a expensas de no poder disminuir las emisiones de GEI, sino aumentarlas (MEM, 2022).

Figura 1,

Emisiones de GEI por actividad (%). Fuente(MEM, 2022).



Nota: Emisiones en miles de toneladas de CO₂.

2.1.2. Emisiones durante la refinación

La industria de la refinación de petróleo juega un papel fundamental en la cadena de suministro de energía y está estrechamente relacionada con el cambio climático.

Es el tercer mayor emisor de gases de efecto invernadero a nivel mundial entre las instalaciones estacionarias, contribuyendo con un 6% del total de emisiones industriales de estos gases.

De manera más específica, el dióxido de carbono constituye aproximadamente el 98% de las emisiones generadas por las refinerías de petróleo (One earth, 2018).

Figura 2,

Emisiones de una refinería en operación. Fuente: (Expansion, 2022)



2.1.3 Efectos ambientales de la refinación de crudo en el cantón La Libertad

La Refinería “La Libertad” se especializa en la refinación del petróleo con el objetivo de producir derivados de excelente calidad para atender la demanda de combustible en Ecuador.

Esta industria está comprometida con asegurar la prevención y el control de la contaminación ambiental resultante de las operaciones en los diversos procesos de refinación, incluyendo la contaminación al suelo, contaminación del agua superficial y subterránea, agotamiento de recursos naturales no renovables y contaminación del aire (Pizarro, 2016).

2.2. Criterios de sostenibilidad en la industria petrolera del Ecuador

Los criterios de sostenibilidad en la industria petrolera se centran en reducir el impacto ambiental, promover la responsabilidad social y garantizar la viabilidad económica.

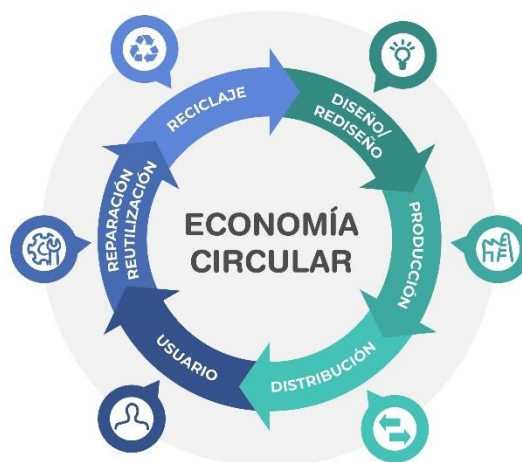
Esto implica la gestión responsable de recursos naturales, la reducción de emisiones de carbono, la inversión en energías renovables, y la adopción de prácticas éticas en comunidades afectadas, todo mientras se mantienen operaciones rentables a largo plazo (Fontaine et al., 2003).

2.2.1. Economía circular

La economía circular es un paradigma que plantea la regeneración y restauración de ecosistemas a través de un cambio estratégico de producción y consumo, evitando la generación de residuos desde el diseño (CIEC, 2021).

Figura 3,

Economía circular. Fuente: (Tendencias creativas, 2022)



2.2.2. Desafíos ambientales y sociales

La sostenibilidad es la clave de un futuro objetivo, alcanzarla se ha convertido en un desafío en tanto que las actividades humanas que contribuyen a la degradación del planeta, a menudo relacionadas con políticas económicas que benefician a unos pocos en detrimento de la mayoría (Chasqui, 2020).

En la actualidad, Ecuador está poniendo un mayor énfasis en políticas destinadas a recuperar y revalorizar su papel de Estado como una herramienta de regulación y transformación económica y social. Además, se busca un mejor equilibrio entre el crecimiento económico y el bienestar social, al tiempo que se prioriza la sostenibilidad ambiental (Echeverría & Peña, 2012).

2.2.3. Plan nacional de adaptación al cambio climático del Ecuador

El Plan Nacional de Adaptación (PNA) es un enfoque continuo y estratégico que tiene como objetivo principal impulsar el desarrollo sostenible del país.

Incorporando el cambio climático en la planificación territorial, lo que permite identificar las prioridades tanto a nivel nacional, local y sectorial que requieren ser abordadas en el mediano y largo plazo (MAATE, 2023).

2.2.4. Plan de desarrollo empresarial de EP PETROECUADOR 2021-2025

El plan estratégico se concibe como una herramienta de respaldo para asegurar la implementación de la política energética definida por el Estado en el sector de los hidrocarburos.

Su finalidad es proporcionar los recursos necesarios para operar en un entorno altamente competitivo, al tiempo que se maximiza la rentabilidad petrolera en beneficio de los ciudadanos ecuatorianos (Petroecuador EP, 2021).

2.3. Ecoáridos implementados a la industria petrolera

Los ecoáridos se fabrican a partir de RCD y de CO₂ capturado en las instalaciones industriales de refinación.

Esto conlleva un beneficio medioambiental sustancial, ya que transforma residuos en productos de construcción, al mismo tiempo que se emplea CO₂ en este proceso, promoviendo la economía circular y reduciendo la concentración de CO₂ en el ambiente. Asimismo, destaca como un ejemplo sobresaliente de simbiosis entre el sector de refinación y el de la construcción (AgreggaCO₂, 2021).

Figura 4.

Cadena de procesos a macro escala. Fuente: (OCO Technology, 2021)



Nota: La figura indica a modo de secuencia la captura de CO₂, su transporte a una planta de tratamiento de áridos residuales y su posterior conversión a ecoáridos, además del uso final en el área de construcción.

2.3.1. Carbonatación acelerada

El proceso de carbonatación acelerada (ACT) es un método que utiliza tres elementos esenciales: dióxido de carbono, agua y un sólido reactivo. El sólido reactivo contiene calcio, que reacciona con el dióxido de carbono para generar carbonato de calcio, comúnmente conocido como piedra caliza.

Los sólidos reactivos pueden ser materiales como rocas o residuos naturales, los cuales se producen en abundancia como subproductos de numerosos procesos industriales convencionales (Gunning, 2022).

2.3.2. Ecoáridos y su potencial en la industria petrolera

Repsol ha estado trabajando en la implementación de principios de economía circular desde 2016, con un enfoque en reducir la huella de carbono en la fabricación de productos y en la búsqueda de métodos más sostenibles.

Esto se refleja en su proyecto de ecoáridos, que utiliza cenizas de la incineración de residuos sólidos urbanos y CO₂ capturado para crear un material de construcción sostenible.

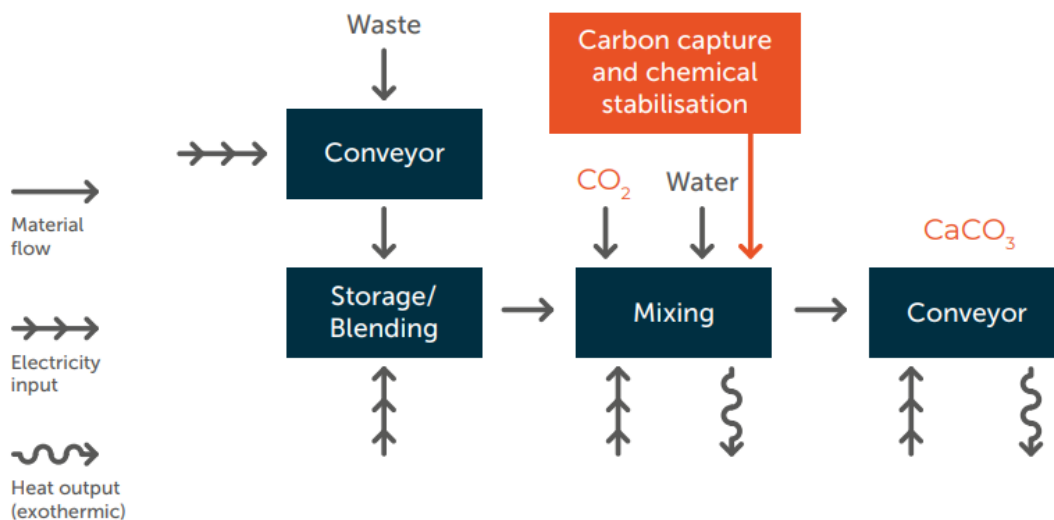
Además, se destaca que, en 2021, el consumo promedio de materiales por persona en España fue considerablemente alto, lo que subraya la importancia de buscar soluciones circulares en sectores como la construcción (Repsol, 2022).

El proyecto AggregaCO₂ expuesto por REPSOL da a conocer que la materia prima para la industria de la construcción son los áridos, principalmente usados en la fabricación de hormigones y carreteras.

Para la fabricación de ecoáridos se parte de CO₂ capturado de la refinería Petronor, y cenizas de los sistemas de depuración de gases de las plantas de residuos sólidos urbanos, reutilizando este residuo, convirtiéndolo en una nueva materia prima y reintroduciéndolo en ciclos productivos. El uso de ecoáridos ayudará a disminuir el consumo de áridos naturales (Repsol, 2021).

Figura 5.

Mapa de procesos generales de carbonatación de áridos residuales. Fuente (OCO Technology, 2021)



Nota: Proceso de elaboración de ecoáridos hecho por OCO Technology.

2.4. Residuos de construcción

2.4.1. Residuos de construcción y demolición

Los residuos de construcción y demolición, conocidos como RCD, se originan en actividades relacionadas con la construcción, demolición y reparación de obras civiles.

Es esencial identificar estos residuos para determinar sus materias primas, que abarcan elementos como limos, arcillas, cal, yeso, arenas, gravas y triturados provenientes de canteras, así como materiales sintéticos como PVC, resinas, plásticos y poliestireno, metales de origen siderúrgico y materiales naturales como maderas, papel, y material de descapote y excavaciones, entre otros (Giovanny & Salinas, 2019).

Figura 6,

Residuos de construcción. Fuente:(FUSO, 2020)



Nota: Residuos de construcción mezclados, de los cuales son aprovechables el 99,5%

2.4.2. RDC en economía circular

La economía circular en el ámbito de la construcción abarca todo el ciclo de vida de los procesos constructivos, que incluye la edificación de estructuras como edificios, carreteras y puentes. En esta etapa, se enfoca en planificar el uso de productos de construcción de manera que se minimice la generación RCD.

La economía circular busca integrar repetidamente estos residuos en el proceso para seguir generándoles valor.

Esta innovación en el tratamiento de los RCD es de gran relevancia, ya que contribuye a reducir el impacto ambiental y la utilización de recursos naturales. Además, ofrece oportunidades económicas y promueve una gestión efectiva de los residuos de construcción y demolición.

En última instancia, busca mejorar la degradación de recursos, reducir la contaminación, mitigar el impacto visual en el entorno y abordar otros problemas relacionados” (Oliveros, 2021).

2.4.3. Argamasa

La argamasa es una mezcla de materiales utilizada en la construcción, generalmente compuesta por cemento, arena y agua. Esta mezcla se utiliza para unir ladrillos, bloques, piedras u otros materiales de construcción, creando una unión sólida y resistente.

La argamasa se emplea en la construcción de muros, paredes, revestimientos y otras estructuras, y su composición puede variar según el tipo de trabajo y las necesidades específicas (Alberto et al., 2018).

2.4.4. RCD en el cantón la Libertad

Según el artículo 37.4 de constructibilidad especifica que los escombros resultantes de la demolición en el cantón La Libertad podrán ser depositados provisionalmente por tiempos desde 24 horas hasta 72 horas para su recolección y manejo (GAD municipal La Libertad, 2014)

El total de residuos de escombrera producidos por día en Ecuador, “la PPC se ha determinado en un rango de 0.22 a 1.8 kg/hab/día, con un promedio de 0.597 kg/hab/día a nivel país. Los cantones de mayor PPC (1.1–1.8 kg/hab/día) son Guayaquil, Salinas, Pichincha y Jipijapa” (María Fernanda Solíz Torres et al., 2020)

Figura 7,

Escombros -Barrio las acacias. Fuente: Autoría propia



Nota: Se puede apreciar en la fotografía los RCD de color gris, mismos que son característicos de alto contenido de óxido de calcio

Figura 8,

Escombros, zonas cercanas a la Refinería La Libertad. Fuente: Autoría propia



Nota: En la imagen se aprecia RCD en su mayoría cemento y restos de bloques.

Figura 9

Zona con pocos RCD. Fuente: Autoría propia



Nota: se puede apreciar como los RCD son usados para cubrir el suelo.

Figura 10,

Bultos de cemento rellenos con RCD. Fuente Autoría propia



Nota: se puede apreciar sacos de 25kg rellenos con RCD.

2.5. Dióxido de carbono

El dióxido de carbono, conocido como CO₂, es un gas que carece de color y olor y está compuesto por átomos de oxígeno y carbono. Sus emisiones representan una de las principales causas del cambio climático global.

Este problema es originado por la actividad humana y se agrava debido a la larga permanencia del CO₂ en la atmósfera (BBVA, 2023).

2.6. Métodos de captura de dióxido de carbono

2.6.1. Métodos de captura y almacenamiento de dióxido de carbono

Las tecnologías de captura de dióxido de carbono (CO₂) en plantas de generación de energía utilizando combustibles fósiles se pueden clasificar en cuatro categorías, cada una con enfoques distintos para la captura de CO₂. Estas cuatro categorías acorde a (Moreno Sanz & Vega Borrero, 2019) son:

- Post-combustión: captura de CO₂ de los gases resultantes de la combustión con aire.
- Pre-combustión: captura de CO₂ de un gas de síntesis antes de la combustión.
- Oxy-combustión: captura de CO₂ de los gases de combustión creados en la combustión con oxígeno.
- Combustión química en bucle: captura de CO₂ de los gases de combustión en la combustión con oxígeno de transportados mediante un óxido metálico.

2.6.2. Absorción natural de dióxido de carbono

Las formaciones vegetales cumplen la función esencial de actuar como sumideros de carbono gracias a su proceso principal, la fotosíntesis.

A través de este proceso, las plantas absorben el dióxido de carbono (CO_2), lo que compensa tanto las pérdidas de este gas debido a la respiración como las emisiones que se generan en otros procesos naturales, como la descomposición de la materia orgánica (Carvajal, 2012).

El océano actúa como un sumidero significativo del CO_2 antropogénico albergando aproximadamente cincuenta veces más CO_2 que la atmósfera y alrededor de quince veces más que la cantidad presente en los suelos y la vida terrestre.

El CO_2 se desplaza entre la atmósfera y los océanos a través de la difusión molecular, siempre que exista una diferencia en la presión parcial cerca de la interfaz entre ambos (Alvarez-Borrego, 1982).

2.6.3. Captura de CO_2 durante la refinación de crudo

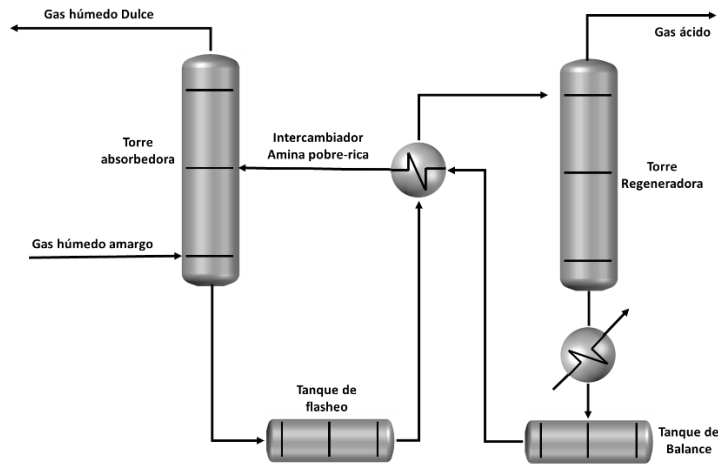
La captura de carbono ha sido una práctica existente durante un tiempo considerable, pero recientemente ha habido un creciente interés en su aplicación para potenciar la producción de petróleo.

Esto abarca el uso de CO_2 en la recuperación mejorada de petróleo (EOR), que implica la inyección de CO_2 en yacimientos petroleros existentes para aumentar su rendimiento.

Además, puede emplearse en combinación con otras tecnologías, como las pilas de combustible de hidrógeno, que tienen la capacidad de generar energía limpia y reducir las emisiones (RS Clare, 2023).

Figura 11.

Proceso de separación de CO₂ del gas, Fuente: (Perez, 2019)



El dióxido de carbono es separado en la unidad de regeneración y absorción de aminas, estas últimas son separadas en un sistema de drenaje cerrado que recupera los vertidos de aminas, evitando se sean purgadas (IPC, 2007).

2.6.4. Métodos de almacenamiento de dióxido de carbono

Los depósitos geológicos adecuados para el almacenamiento de CO₂ comprenden reservas agotadas de gas y petróleo, acuíferos salinos profundos y lechos de carbón no explotables.

En general, los sitios de almacenamiento deben encontrarse a profundidades de al menos 800 metros, donde la presión predominante permite que el CO₂ se mantenga en un estado que es tanto líquido como supercrítico (Greenfacts, 2005).

2.7. Mineralización de dióxido de carbono

2.7.1. Método de mineralización de dióxido de carbono

El aspecto técnico fundamental del secuestro mineral de CO₂ radica en emular la reacción natural que tiene lugar en la conversión de minerales en carbonatos. Aunque la reacción es termodinámicamente favorable, en la naturaleza, su velocidad es excepcionalmente lenta, tomando cientos de miles de años. La esencia del desafío consiste en acelerar esta reacción de manera que sea posible diseñar un proceso económicamente rentable (Sacyr, 1990).

2.7.2. Método de carbonatación acelerada en hormigón

El proceso de carbonatación inicialmente provoca la neutralización de la pasta de cemento y posteriormente la corrosión de las armaduras en las estructuras de hormigón.

El mecanismo de esta reacción está regulado por etapas de difusión, lo que resulta en una velocidad que requiere varios años para lograr una extensión significativa de la neutralización (Linares & Sánchez, 2003).

2.8. Equipos, herramientas e insumos necesarios

2.8.1. Equipos

Tabla 1.

Equipo de protección personal. Fuente: Elaboración propia

Equipos de protección personal a nivel industrial	
Casco	Cascos de seguridad profesionales, gorras antigolpes, redecillas para el pelo y cascos de bombero.
Lentes	Lentes protectores, gafas protectoras, mascarillas faciales, caretas de protección y viseras.
Guantes	Guantes, guantes con puño protector o guantes largos.
Cubrebocas	Filtros industriales o mascarillas.
Traje	Monos de trabajo convencionales o desechables, batas, delantales y ropa de protección química.
Botas	Calzado de seguridad con punteras protectoras y resistentes a las penetraciones.
Audífonos	Protectores auditivos.

Nota: equipos de protección a ser usados por protocolo.

2.8.2. Materias primas y herramientas

Tabla 2.

Materiales y herramientas. Fuente: Elaboración propia

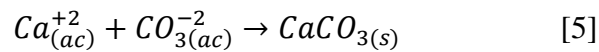
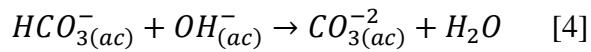
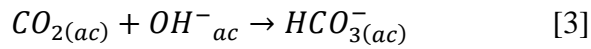
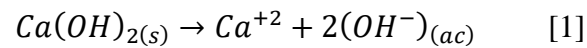
Materias primas
Agua
Árido residual
Dióxido de carbono
Herramientas
Recipiente hermético
Espátula

Nota: Estos son los materiales básicos, acorde al método de carbonatación y su aplicación.

2.9. Procedimiento de fabricación ecoáridos por carbonatación acelerada.

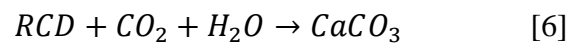
2.9.1. Método de carbonatación aplicada al CO₂ atmosférico.

La carbonatación empieza con la entrada del CO₂ atmosférico al concreto a través de sus poros. Este gas se disuelve en la solución alcalina, reacciona con los iones de calcio (Ca⁺⁺) presentes, formando carbonato de calcio (CaCO₃), según (Linares & Sanchez, 2003) es:



2.10. Formula química general de un ecoárido

Según (Repsol, 2021), la formula básica de un ecoárido es:



- RCD: Residuo de Construcción y/o Demolición
- CO₂: Dióxido de carbono
- H₂O: Agua
- CaCO₃: Carbonato de calcio (ecoárido)

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1. Método de investigación

Figura 12.

Metodología de la investigación aplicada.



3.2 Tipo de estudio

El tipo de estudio en el tema “Producción de ecoáridos a partir de dióxido de carbono capturado de procesos industriales de la refinería La Libertad mediante pruebas de laboratorio” es investigación documental, bibliográfica y experimental, manipulando así: las variables, muestras de áridos y el ambiente de las pruebas en el laboratorio de Petróleo de la UPSE.

3.3 Población

- Áridos residuales de construcción o demolición.
- Dióxido de carbono capturado en la refinería La Libertad.

3.4 Muestra

- Árido residual compuesto principalmente de cal.
- Dióxido de carbono almacenado en tanques.

3.5 Equipos y materiales

Tabla 1.

Equipos y materiales

Equipos	Materiales
<ul style="list-style-type: none">• Balanza• Vaso medidor• Cámara fotográfica• Computador	<ul style="list-style-type: none">• Espátula para mezclas• Recipiente plástico• Muestras de áridos residuales• Dióxido de carbono

3.6 Toma y recolección de muestras

Las muestras de áridos residuales procedentes de Residuos de Construcción y Demolición (RCD), se mezclarán con agua y dióxido de carbono para realizar el proceso de carbonatación acelerada (curado), sin incluir ningún tipo de catalizador.

3.6.1 Muestras recolectadas

Figura 13,

Muestras recolectadas.



Figura 14,

Muestras de cemento para pruebas de carbonatación en cilindros



3.7 Dióxido de carbono y RCD

3.7.1 Cantidades de CO₂ producidos y capturados en la refinería La Libertad

Tabla 2.

Cantidad de emisiones de gases. Fuente:(IPC, 2007)

Emisión de gases		
Parámetro	Unidad	Referencia de la industria
Dióxido de carbono		25000 – 40000
Óxidos de nitrógeno	Toneladas/millón de	90-450
Partículas Sólidas	toneladas de petróleo	60-150
Óxidos de azufre	crudo procesado	60-300
Compuestos orgánicos volátiles		120-300

Nota: los valores son aproximados debido a la variabilidad de las cantidades de petróleo refinado por día-mes-año, se aclara que es un estimado en termino general.

Tabla 3.

RCD producidos a nivel inter-cantonal. Fuente:(María Fernanda Solíz Torres et al., 2020)

RCD producidos en el cantón La Libertad		
Cantones	Cantidad diaria	Cantidad anual
La Libertad – Jipijapa - Guayaquil	1.1–1.8 kg/hab/día	401.5-657 kg/hab/año

Nota: Se ha tomado al información de “Cartografía Ecuador” en que se considera varios cantones en la producción de RCD para poder apreciar valores significativos.

3.8 Método de carbonatación acelerada por formación de capa carbonatada

El método acelerado de carbonatación consiste en elevar las concentraciones de CO₂ a niveles muy superiores a los existentes en la atmosfera.

Los ecoáridos se obtienen en una cámara de curado con generación directa de dióxido de carbono o con una fuente con dióxido de carbono almacenado, la velocidad de carbonatación se mide con la fórmula matemática (1):

$$X_{CO_2} = K_{CO_2} * \sqrt{t} \quad (1)$$

Donde:

X_{CO2}: Es el espesor de la capa carbonatada

t: Es el tiempo de exposición

K_{CO2}: Es el coeficiente de carbonatación (3 y 4 mm /año^{0.5})

Para determinar si se forma una capa carbonatada o todo el material se ha carbonatado, que el preferencia se busca lo segundo, de calculará mediante la fórmula matemática 1.

Cálculo de capa carbonatada:

Cálculo:

t: 7 días

$$X_{CO_2} = 0.3 * \sqrt{7}$$

$$X_{CO_2} = 0.079mm$$

3.8.1. Anhidrido carbónico en la atmosfera

La presencia de CO₂ es fundamental para que ocurra y se desarrolle el proceso de carbonatación cerca de las estructuras, y esta presencia aumenta constantemente debido a las actividades humanas, industriales y procesos naturales.

Las concentraciones de CO₂ pueden variar en diferentes entornos exteriores, como zonas rurales, urbanas, industriales o mixtas, así como en interiores, lo que puede dar lugar a concentraciones más altas que las del entorno exterior.

3.8.2. Valores de CO₂ absorbido

Todo el material compuesto por óxido de calcio (CaO) puede carbonatarse, absorbiendo CO₂ en el proceso, pudiéndose calcular mediante:

$$CO_{2\text{ abs.}} = 0.75 * CUC * CaO * MCO_2 / MCa_2 \quad (2)$$

Donde:

CUC: Contenido unitario de árido $\frac{kg}{m^3}$

CaO: Contenido de CaO del cemento, en porcentaje

MCO₂ y *MCa₂*: Peso molecular del CO₂ y del CaO

3.8.3 Cálculo de concentraciones de CO₂ en ecoáridos

Para calcular la concentración CO₂ en los ecoáridos resultantes se hace uso de la fórmula (2) anteriormente descrita.

Tabla 4

Cálculos teóricos de volumen y dióxido de carbono absorbido.

Producto (árido)			Resultado (ecoárido)	
Datos base de muestras:	<i>Peso Molecular del CaO: 56.07 g/mol</i>	Fórmula:	Fórmula:	
	<i>Peso Molecular del CaO: 56.07 g/mol</i>	$\rho = m/V$	$CO_{2\ abs.} = 0.75 * CUC * CaO * MCO_2/MCa_2$	
Muestras	Peso (gr)	Volumen (cm3)	Material carbonatable (100gr y volumen de 0.00025) (CUC)	CO₂ Absorbido por cada 100gr <i>CO₂ abs.</i>
Muestra 1	500	347.22		$58.86 \frac{kg}{m^3}$
Muestra 2	475	329.86		$82.41 \frac{kg}{m^3}$
Muestra 3	450	312.50	$400 \frac{kg}{m^3}$	$94.188 \frac{kg}{m^3}$
Muestra 4	425	295.14		$105.96 \frac{kg}{m^3}$

3.8.4 Preparación de muestras de RCD recolectados

Las muestras de áridos se prepararon utilizando balanza, agua, dióxido de carbono, recipiente y mezclador.

Cada muestra de árido en específico se pesó, manteniendo homogeneidad en el granulado gracias al tamizado de estas, pesándose 100g y 100ml de agua y 0.008g/ml de dióxido de carbono, esta mezcla fue vertida en un recipiente, dejándose fraguar por 1 semana (168 horas).

Figura 15,

Muestras de RCD siendo pulverizados



En la imagen se aprecia como se tritura hasta pulverizar los RCD recolectados, buscando reducir en mayor medida la muestra, para esto se utilizó un recipiente metálico tipo caja y un martillo (combo).

Figura

16,

Tamizaje y probeta con agua

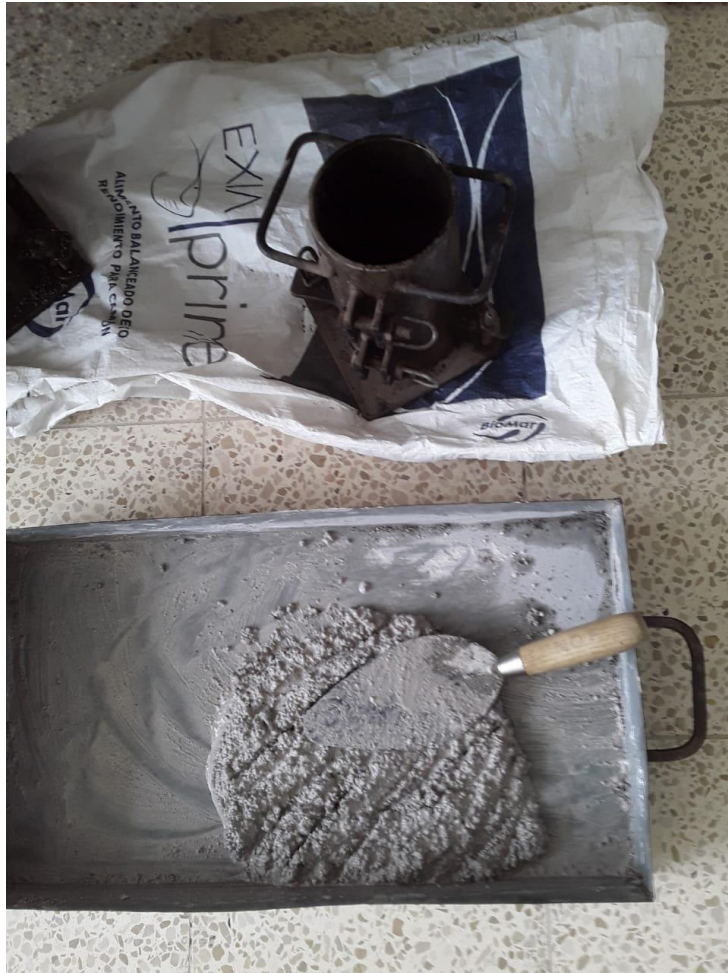


El tamizaje se realizó en un tamiz #4, con el que se buscó tener una granulometría adecuada, su medida fue de 1 mm, a fin de garantizar un correcta preparación de las muestras especiales, misma que se pulverizarán para generar un residuo ideal de trabajo.

La relación agua-cemento es de 0.4, permitiendo una correcta mezcla, como aprecia en la figura 17, no se llenó completamente, el recipiente cilíndrico metálico, las medidas de este son, 20x15, el total de mezcla preparada es superior a 2 kg.

Figura 17

Preparación de la probeta cilíndrica con el cemento de muestra ideal



La probeta en la figura 17, fue previamente engrasada para permitir su desmolde, las muestras obtenidas de este procedimiento se tomaron después de 4 días de fraguado a temperatura y presión ambiente.

3.8.5 Aditivar muestras de ecoáridos con CO₂

Para aditivar muestras de ecoáridos con dióxido de carbono se describe a continuación:

- Se preparan varias muestras de áridos residuales con un mismo peso.
- Se aditivan las muestras de áridos con dióxido de carbono.
- Se espera una semana (168 horas) entre lo que al muestra fragua totalmente.
- Se separa cada muestra preparada y se analiza.

Figura 18,

Muestra pulverizada e hidratada, obtenida de las muestras ideales previamente hechas



La muestra en la figura 18 esta compuesta 60% de cemento - 40% de agua, la mezcla esta en un recipiente de acero de 1mm de espesor, 11 cm de ancho y 15 cm de profundidad, ideal para soporta dióxido de carbono, a altas presiones y es hermético.

Figura 19,

Cámara provisional de carbonatación acelerada



En la figura 19 se aprecia claramente la tapa de cierre hermético, y una prensa de tornillo que sirve para ajustarla al cilindro y permitir un cierre total del sistema, por la manguera de color negro, pasa el dióxido de carbono que se mezcla con el agua y el árido rico en calcio para obtener el carbonato de calcio.

Figura 20,

Pipeta de CO₂ y válvula.



En la figura 20 se aprecia detenidamente la válvula principal de la pipeta, el medidor de presión y un medidor por cantidad de volumen saliente, se nota que la bola de acero esta detenida, eso sucede debido a que se alcanza un nivel de saturación total del sistema y el total del agua ha sido desplaza o absorbida y el dióxido de carbono sale del sistema y ya no es retenido.

Figura 21,

bicarbonato de calcio



En la figura 21 se aprecia el bicarbonato de calcio obtenido, la muestra es muy pequeña, y al cantidad obtenida después de evaporación es menor, sin embargo, durante las pruebas el carbonato obtenido en las muestras es superior al 60% de la masa total ingresada en el cilindro.

CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1. Parámetros de las muestras de áridos de RDC

4.1.1 Absorción de dióxido de carbono

En las pruebas teóricas de absorción de dióxido de carbono de las muestras de RCD, áridos con alto contenido de óxido de calcio, mostrados en tabla 6 y clasificados según su concentración de óxido de calcio.

Tabla 5,

Resultado de dióxido de carbono absorbido en las muestras de RCD

Muestra	Absorción de dióxido de carbono (Kg/m^3)
M1	58,86
M2	82,41
M3	94,18
M4	105,6

Nota Los valores obtenidos en esta tabla, son los indicados en Tabla 4.

4.1.2 Discusión y observación

En la tabla número 6 se presentan los resultado de absorción de dióxido de carbono para cada una de las muestras analizadas, entre mayor contenido de óxido de calcio, mayor es la absorción de dióxido de carbono.

Figura 22,

Muestras carbonatadas



En la figura 22 se aprecian las muestras carbonatadas de forma cilíndrica, entre mayor es la exposición al dióxido de carbono mayor es el nivel de carbonatación, llegando claramente a un punto de saturación.

4.1.2 Material carbonatable

Los resultados obtenidos del material carbonatable mostrados en la tabla 7, demuestran que los ecoáridos tienen una capacidad de absorción que varía según su concentración tiempo de exposición siendo un valor de 0.079mm alcanzados por cada semana de exposición continua a 0.008g/ml.

4.2 Pruebas de laboratorio

Los resultados del método en las muestras, M1, M2, M3 y M4 fueron satisfactorios con la aplicación de dióxido de carbono para obtener carbonato de calcio.

4.2.3 Pruebas de calcimetría por método químico

Un procedimiento importante a tener en cuenta es la prueba de calcimetría la cual mide la cantidad de calcio en las muestras a carbonatar o en muestras ya carbonatadas, para esto se usa una reacción exotérmica, ácido clorhídrico que al reaccionar con el calcio presente libera calor y CO₂.

4.3 Método de ácido clorhídrico

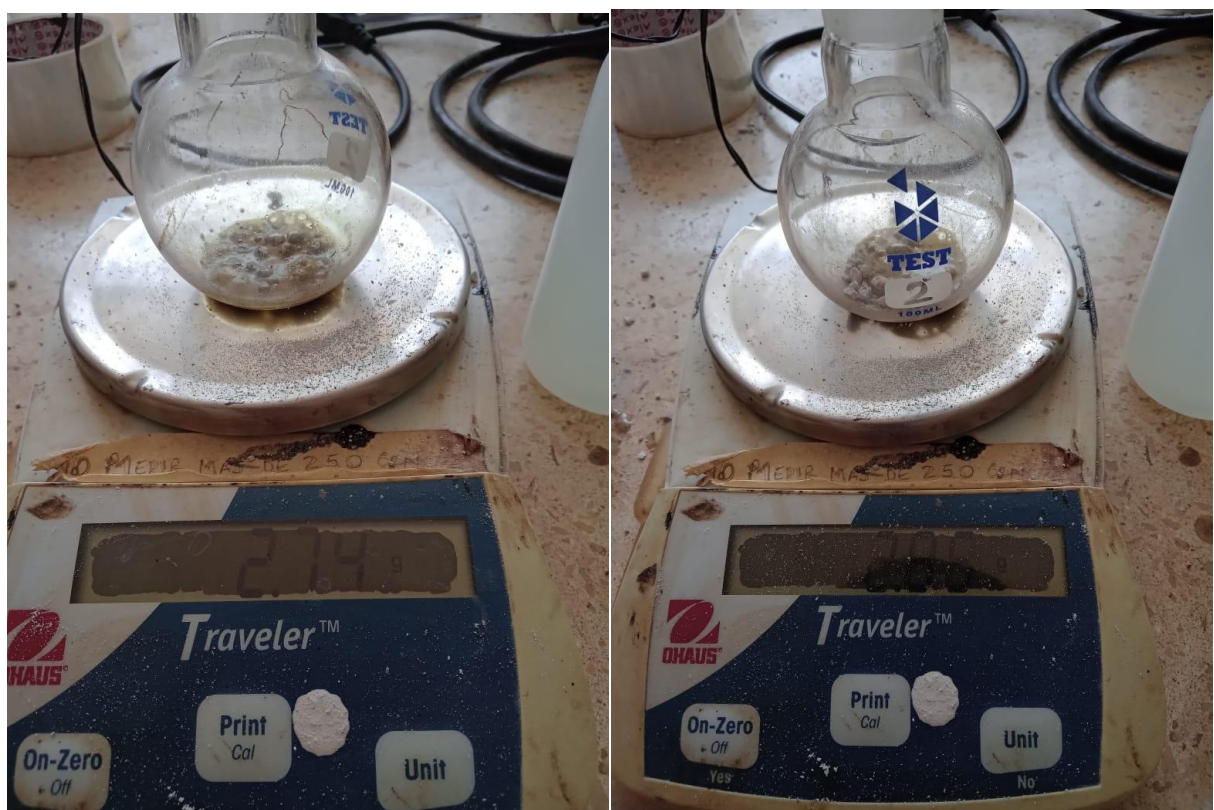
La finalidad de este procedimiento tiene dos objetivos, el primero es determinar la cantidad de calcio posible a extraer en una muestra y el segundo es medir la cantidad total de dióxido de carbono absorbido.

El procedimiento es muy simple, consiste en poner una muestra de proporción 50/50, es decir cantidades igual es de ácido clorhídrico con la muestra de calcio, para este caso se usaron 2 gramos de material carbonatable y 2ml de ácido clorhídrico.

Cuando esta reacción ocurre, el ácido clorhídrico reacciona con todo el calcio en la muestra de 2g, y haciendo uso de una pesa de mili y micro gramos, se puede determinar por diferencia de masa la cantidad másica de gas liberado, siendo este puramente dióxido de carbono.

Figura
Liberación de CO₂ en balanza analítica

23,



Se puede observar en la figura que el cambio de masa medido en miligramos es notable, teniendo una reducción de 12 miligramos, al momento de liberar el dióxido de carbono.

CAPITULO V: CONCLUSIONES Y

RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

La producción de bicarbonato de calcio a través de la carbonatación acelerada podría beneficiarse de la utilización de subproductos industriales, como el dióxido de carbono generado en la purificación y procesamiento del gas licuado de petróleo (GLP). Esta sinergia entre la producción de GLP y la obtención de bicarbonato podría mejorar la eficiencia y la sostenibilidad en ciertas operaciones industriales.

Considerar la posibilidad de utilizar el CO₂ derivado del GLP como reactivo en la producción de bicarbonato de calcio podría ofrecer una solución integral en la gestión de residuos o subproductos, creando así una sinergia dentro de la cadena de suministro y reduciendo el impacto ambiental.

La utilización de CO₂ del GLP para la producción de bicarbonato de calcio tiene implicaciones ambientales, tanto en términos de reducción de emisiones como de cumplimiento normativo. Investigaciones adicionales podrían centrarse en cuantificar y evaluar los impactos ambientales netos de este proceso.

La integración de la producción de bicarbonato de calcio a partir de CO₂ del GLP podría ser un ejemplo destacado de economía circular. Esto involucra la reutilización de subproductos industriales para crear productos valiosos, fomentando así la sostenibilidad y minimizando el desperdicio en la cadena de suministro.

5.2 RECOMENDACIONES

Controlar y medir cuidadosamente las condiciones experimentales específicas de una refinería, como la concentración de la solución de cal apagada, la presión y la temperatura durante la carbonatación, adaptándolas a las condiciones industriales del entorno de trabajo.

Verificar la calidad y pureza de los reactivos, especialmente el dióxido de carbono proveniente de los procesos de la refinería, asegurándose de utilizar equipos precisos para obtener resultados confiables en un entorno industrial, con énfasis en el tratamiento de sulfuro de carbonilo.

Mantener un registro detallado de los procedimientos realizados en la refinería, incluyendo las cantidades de reactivos utilizados, tiempo de reacción, condiciones ambientales específicas de la refinería y observaciones relevantes para un análisis preciso.

Cuantificar por método químico de calcimetría inverso utilizado en esta investigación, la cantidad de dióxido de carbono absorbida real, los sólidos no reactivos y el carbonato de calcio total obtenido, fijándose un promedio de 60% en las mejores condiciones y el análisis residual de líquidos compuesto por cloruro de sodio y agua.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberto, W., Garcia, P., Andres, J., & Tapia, S. (2018). *escuela superior politécnica del litoral Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra*.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/xmlui/bitstream/handle/123456789/46688/D-CD70298.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Alvarez-Borrego, S. (1982). *Principios generales del ciclo del carbono Principios generales del ciclo del carbono en el océano*.
<https://www.divulgameteo.es/uploads/Ciclo-carbono-oc%C3%A9ano.pdf>
- BBVA. (2021). *Convertir el CO₂ de gas invernadero a materia prima*.
- Carrasco. (2018). *pontifica universidad católica del ecuador facultad de arquitectura diseño y artes disertación*.
- Carvajal, M. (2012). *investigación sobre la absorción de co 2 por los cultivos más representativos*. http://www.lessco2.es/pdfs/noticias/ponencia_cisc_espanol.pdf
- Chasqui. (2020). *Los desafíos de la cobertura ambiental en tiempos de crisis*.
- CIEC. (2021). *Libro blanco de Economía circular de Ecuador*.
https://www.produccion.gob.ec/wp-content/uploads/2021/05/Libro-Blanco-final-web_mayo102021.pdf
- Echeverría, L., & Peña, E. J. (2012). *facultad latinoamericana de ciencias sociales sede ecuador programa de estudios políticos*.
<https://repositorio.flacsoandes.edu.ec/bitstream/10469/5306/2/TFLACSO-2012JEPLE.pdf>

Expansion. (2022). *China encabeza un nuevo récord global de emisiones de CO2 en 2021*. <https://expansion.mx/empresas/2022/03/18/china-encabeza-un-nuevo-record-global-emisiones-co2-2021>

Fontaine, G., FLACSO (Organization). Sede Ecuador., & PETROECUADOR (Organization). (2003). *Petróleo y desarrollo sostenible en Ecuador*. FLACSO, Sede Académica de Ecuador.

García. (2016). *universidad nacional agraria la molina*.
<https://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12996/3119/garcia-quiroz-maria-olivia.pdf?sequence=4>

Greenfacts. (2005). *Consenso Científico sobre IPCC (2005) Resumen & Detalles: Nivel 2-Detalles sobre Captura y Almacenamiento de CO 2*. <http://www.greenfacts.org/>

Herrero-Hechavarría, D., González-Díaz, L., Castaño-Cardoza Zenaida Paulette Frómeta-Salas, T., Castaño-Cardoza, T., & Paulette Frómeta-Salas, Z. (2016). *evaluación de la factibilidad técnico-económica de la producción de áridos reciclados mixtos en santiago de cuba*.
<https://www.redalyc.org/pdf/1813/181351126001.pdf>

IPC. (2007). *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad*.
<http://www.ifc.org/ifcext/sustainability.nsf/Content/Environmental>

Linares, & Sanchez. (2003). *construction, operation and performance of a chamber for tests of accelerated carbonation*.
https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0254-07702003000100006

María Fernanda Solíz Torres, Juan Sebastián Durango Cordero, José Luis Solano Peláez,
& Milena Alía Yépez Fuentes. (2020). *Cartografía-residuos-sólidos-Ecuador-2020*.
<https://www.no-burn.org/wp-content/uploads/Cartograf%C3%ADa-residuos-s%C3%B3lidos-Ecuador-2020.pdf>

MEM. (2022). *Balance energético nacional 2022*. www.recursoyenergia.gob.ec

Moreno Sanz, S., & Vega Borrero, F. (2019). *Estudio de sistemas de captura de CO2 y métodos de concentración de CO2 en corrientes gaseosas aplicados a ciclos combinados*. <https://idus.us.es/bitstream/handle/11441/100929/TFG-2427-MORENO%20SANZ%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Oliveros, L. (2021). *alternativas dentro de la economía circular para el aprovechamiento de los residuos de construcción y demolición (rcd) luisa fernanda oliveros sanchez universidad antonio nariño facultad de ingeniería ambiental y civil programa de ingeniería ambiental*.
<http://repositorio.uan.edu.co/bitstream/123456789/5000/1/2021LuisaFernandaOliverosSanchez.pdf>

Perez, J. (2019). *Procesos industriales en los Centros de Procesamiento de Gas*.
<https://www.linkedin.com/pulse/procesos-industriales-en-los-centros-de-procesamiento-p%C3%A9rez-ruiz/?originalSubdomain=es>

Petroecuador EP. (2021). *Plan de desarrollo empresarial de EP PETROECUADOR 2021-2025*. <https://www.eppetroecuador.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/07/Plan-Estrategico-Empresarial-2021-2025-APROBADO.pdf>

Pizarro, C. (2016). *elaboración de un sistema de gestión ambiental en base a la norma iso 14001: 2004 para mejorar el desempeño ambiental en la refinería la libertad en el área de no catalíticas conformado por los sitios operativos planta parsons, universal y planta cautivo, ubicada en el cantón la libertad, provincia de santa elena.* <https://repositorio.upse.edu.ec/bitstream/46000/3618/1/UPSE-TII-2015-049.pdf>

Sarasola, L., & Caballero, S. (2012). mineralización de dióxido de carbono mediante carbonatación de residuos térmicos. *dyna energia y sostenibilidad*, 1(3), [12 p.]-[12 p.]. <https://doi.org/10.6036/es1003>

Tendencias creativas. (2022). *Diseño y economía circular.* <https://tendenciascreativas.com.ar/disen-y-economia-circular/>