



FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

Especialidad de Ingeniería Civil

**ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA UBICACIÓN
DE LOS POSIBLES PROYECTOS DE INYECCIÓN
GEOLÓGICA DE CO₂ EN EL PERÚ.**

Tesis para optar por el Título de Ingeniero Civil, que presenta el bachiller

Victor Gabriel Carlotto Cano - 20132041

Asesora: Dra. Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo



CIENCIAACTIVA

Becas y Co-financiamiento de Concytec

Lima, julio de 2019

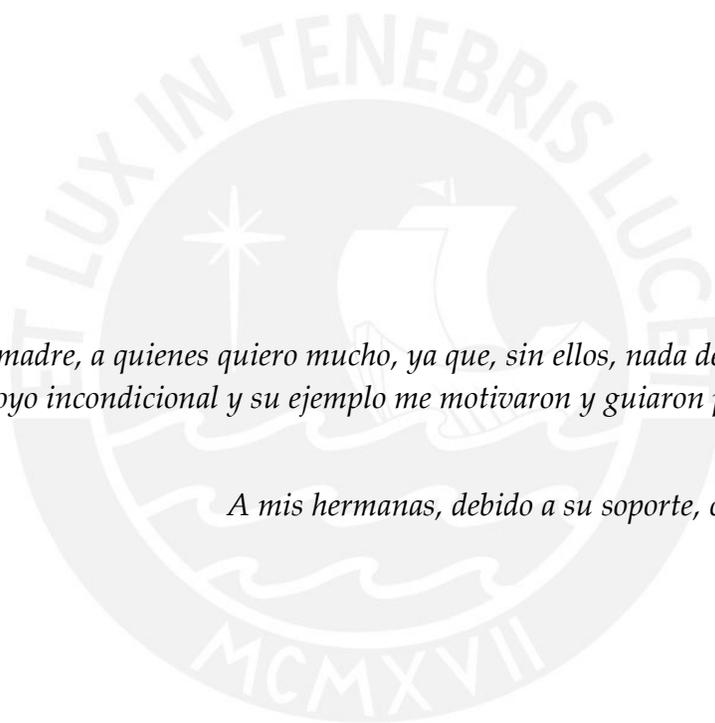
RESUMEN

El cambio climático es, en la actualidad, un problema que afecta severamente al planeta. Una de las principales causas de este fenómeno es la intensificación del efecto invernadero, debido principalmente al aumento de emisiones de gases, como el dióxido de carbono (CO₂), hacia la atmósfera. En este contexto, se buscan medidas de mitigación ambiental, que puedan reducir la vulnerabilidad ante esta, cada vez más latente, amenaza. Así, uno de los nuevos enfoques en los que se viene trabajando a nivel mundial es la captura de CO₂ desde su fuente emisora, su transporte y su respectivo almacenamiento geológico (CCS). En el presente trabajo, el objetivo comprende la revisión y análisis de información contemporánea que existe sobre los métodos y herramientas de análisis multicriterio que, combinados con una serie de parámetros de diversa índole, servirán para el establecimiento de sitios potenciales donde podría establecerse proyectos de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ en el Perú. Es por ello que, en la presente investigación se desarrollaron dos talleres participativos con un amplio grupo de académicos y profesionales, en diversas áreas afines a las dimensiones tomadas en consideración para el proyecto. Dichos talleres determinaron la relevancia o importancia de cada criterio seleccionado, enmarcado al contexto peruano. Posteriormente, se desarrolló la evaluación del potencial de las zonas, a nivel nacional, donde se podría realizar la inyección geológica de CO₂, como una medida de mitigación ambiental. Esta evaluación contó con veintitrés diferentes criterios, extraídos de la literatura técnica y aportados en el taller participativo, pertenecientes a diferentes dimensiones: geológica, social, ambiental, económica y técnica. Tomando en consideración la generalidad de las locaciones dónde podrían establecerse proyectos de inyección geológica de CO₂ y diferentes criterios de eliminación, se establecieron trece lotes de hidrocarburos como potenciales zonas de inyección. Mediante la técnica de orden de preferencia por similitud a la solución ideal (TOPSIS) se estableció un *ranking*, en función de las condiciones más óptimas y menos desfavorables, de dichos sitios potenciales. Finalmente, a partir de dicha clasificación, se elaboró un mapa del Perú con los sitios expuestos, arreglados en orden de preferencia.

Palabras clave: Captura, Transporte y Almacenamiento de CO₂ (CCS) – Análisis
Multicriterio – TOPSIS – Inyección geológica de CO₂

Agradecimientos

A CONCYTEC por haber apoyado de manera integral el desarrollo de todo el proyecto 159-2017 FONDECYT, incluyendo el presente trabajo. A mi asesora, doctora Sandra Santa Cruz por la guía, supervisión y constante apoyo que brindó hacia mi persona, durante todo el desenvolvimiento de la investigación. Al equipo, conformado por el doctor Eusebio Ingol y el doctor Alexis Dueñas, por sus aportes académicos y profesionales en el proyecto y, además, por todo el apoyo otorgado. A la doctora Noelia Valderrama, quien me involucró en el proyecto, por su apoyo y sus enseñanzas. A Malena Valdivia, ingeniero Miro Quesada y Perú Petro por haber entregado información pertinente para desarrollar el análisis multicriterio en el presente proyecto. Al doctor Victor Carlotto Caillaux, mi padre, quien me apoyo en la interpretación de la información geológica. A los profesionales del ámbito privado y público que asistieron a los talleres participativos desarrollados en Lima y en Piura, por sus aportes y retroalimentación hacia el proyecto, en especial a los ingenieros Néstor Sosa, Miguel Quispe y Pedro Arriola. Al ingeniero Edwin Zenteno, de la Autoridad Nacional del Agua por haber colaborado con información relacionada a los acuíferos. A Erick Aylas y Rafu Pomar por su apoyo y soporte en el desarrollo de la investigación.



Dedicatoria

*A mi padre y madre, a quienes quiero mucho, ya que, sin ellos, nada de esto sería posible.
Su apoyo incondicional y su ejemplo me motivaron y guiaron para desarrollarme
profesionalmente.*

A mis hermanas, debido a su soporte, confianza y cariño.

TEMA DE TESIS

PARA OPTAR	: Título profesional de Ingeniero Civil
TEMA	: Análisis Multicriterio para la Ubicación de los Posibles Proyectos de la Inyección Geológica de CO ₂ en el Perú.
ÁREA	: Ambiental
ASESOR	: Sandra Cecilia Santa Cruz Hidalgo
ALUMNO(S)	: Victor Gabriel Carlotto Cano
FECHA	: 22/11/18
MÁXIMO	: 100 páginas

DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:

El cambio climático es, en la actualidad, un problema que afecta severamente al planeta. Una de las principales causas de este fenómeno es la intensificación del efecto invernadero, debido principalmente al aumento de emisiones de gases como el dióxido de carbono (CO₂) hacia la atmósfera. Una de las nuevas técnicas de mitigación es la captura de CO₂ desde fuentes emisoras, su transporte y su respectivo almacenamiento geológico, (CCS)

El objetivo general del tema de investigación es determinar las posibles zonas del territorio peruano donde se podría desarrollar proyectos de inyección geológica de CO₂.

Los objetivos específicos son:

- Revisión y análisis de información relevante existente acerca de los proyectos de inyección geológica.
- Definición de parámetros, criterios y dimensiones: Ejecución del taller participativo con panel de expertos, pertenecientes a las áreas afines al proyecto.
- Evaluación del potencial de las zonas dentro del país, donde pueda realizarse la inyección geológica CO₂, mediante la aplicación y desarrollo de técnicas multicriterio.
- Elaboración de mapa del Perú y las locaciones donde podría desarrollarse la inyección geológica de CO₂, de manera jerarquizada.

Contenido

1	Introducción.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.2	Justificación.....	2
1.3	Objetivos.....	3
2	Estado del arte.....	4
2.1	Evaluación de dimensiones y variables del análisis multicriterio.....	4
2.2	Captura, transporte y almacenamiento de CO ₂ (CCS).....	10
2.2.1	Captura de CO ₂	10
2.2.2	Transporte de CO ₂	12
2.2.3	Almacenamiento de CO ₂	15
2.3	Análisis multicriterio.....	17
3	Metodología.....	20
3.1	Búsqueda de información.....	22
3.2	Primer filtro de información.....	23
3.3	Primer taller participativo.....	23
3.4	Segundo filtro de información: MCDM a partir de TOPSIS.....	23
3.5	Segundo taller participativo.....	25
4	Desarrollo, análisis y discusión de resultados.....	26
4.1	Literatura técnica.....	26
4.2	Primer filtro de información.....	27
4.3	Taller participativo.....	28
4.4	Criterios de eliminación: descarte de variables desfavorables para la inyección de CO ₂ en el Perú.....	32
4.5	Segundo filtro de información: superposición de dimensiones y criterios relevantes para la inyección CO ₂ en el Perú.....	39
4.5.1	Cuenca Talara.....	50
4.5.2	Cuenca Sechura.....	66
4.5.3	Cuenca Marañón.....	71
4.5.4	Cuenca Ucayali.....	81
4.6	MCDM para la selección de sitios para proyectos de inyección geológica de CO ₂ , a partir de método TOPSIS.....	84
5	Conclusiones y recomendaciones.....	94
5.1	Conclusiones.....	94

5.2	Recomendaciones	95
6	Bibliografía.....	97
	ANEXO	101

Listado de tablas

Tabla 1:	Escenarios de riesgo para cada peligro. Adaptación del PLANAGERD 2014-2021	5
Tabla 2:	Valores para criterios técnicos (Llamas & Cienfuegos, 2012).....	18
Tabla 3:	Valores para criterios socio-económicos (Llamas & Cienfuegos, 2012)	19
Tabla 4:	Asistentes al Taller participativo para la ubicación de las Posibles Áreas para el Desarrollo de Proyectos de Inyección Geológica de CO ₂ en el Perú.....	30
Tabla 5:	Distribución de sitios posibles de inyección por regiones geográficas	39
Tabla 6:	Tabla con acuerdo de los expertos para la evaluación e identificación de zonas potenciales de almacenamiento de CO ₂	40
Tabla 7:	Componentes, variables, parámetros y valoraciones considerados para la presente investigación. Adaptación de Llamas y Cienfuegos (2012).....	46
Tabla 8:	Valores de porosidad y valoración numérica de lotes en cuenca de Talara	53
Tabla 9:	Valores de permeabilidad de reservorio y valoraciones de lotes en cuenca de Talara	54
Tabla 10:	Valores de espesor de reservorio en Cuenca de Talara.....	55
Tabla 11:	Espesores y sus valoraciones en los lotes, la Cuenca Talara	57
Tabla 12:	Volúmenes de producción en cada lote de la Cuenca Talara	60
Tabla 13:	Cuadro resumen de la evaluación numérica de los criterios considerados para los lotes petroleros de la cuenca de Talara	64
Tabla 14:	Parámetros de los lotes en la Cuenca de Sechura.....	67
Tabla 15:	Cuadro resumen de la evaluación numérica de los criterios considerados para los lotes petroleros de la cuenca de Sechura.....	69
Tabla 16:	Porosidades y valoraciones de lotes en Cuenca Marañón	74
Tabla 17:	Permeabilidades y valores asociados en Cuenca Marañón	74
Tabla 18:	Espesor y profundidad tope de reservorio de lotes en Cuenca Marañón.....	75
Tabla 19:	Capacidad de almacenamiento y valoración de lotes en Cuenca Marañón.....	76
Tabla 20:	Cuadro resumen de la evaluación numérica de los criterios considerados para los lotes petroleros de la cuenca de Marañón	80
Tabla 21:	Porosidad, permeabilidad, espesor, profundidad y capacidad de almacenamiento del lote 126 y sus valoraciones.	81
Tabla 22:	Cuadro resumen de la evaluación numérica de los criterios considerados para los lotes petroleros de Ucayali	83
Tabla 23:	Valores acordados y ponderaciones de los parámetros considerados en el proyecto de investigación	85
Tabla 24:	Matriz general de valores numéricos de los criterios considerados	86
Tabla 25:	Matriz normalizada.....	87
Tabla 26:	Matriz normalizada ponderada	88
Tabla 27:	Valores ideales positivos y negativos para cada criterio.....	89
Tabla 28:	Distancias euclidianas de los ideales positivos (S ⁺) y negativos (S ⁻)	90
Tabla 29:	Proximidades relativas de cada lote a la solución ideal.	91

Listado de figuras

Figura 1: Esquema del impacto del cambio climático en el Perú. Fuente: In-Country NAP Support: Perú – IISD.	2
Figura 2: conflictos sociales en el Perú. Fuente: Defensoría del Pueblo (2016)	9
Figura 3: Esquema del método de captura pre-combustión. Fuente: <i>scottish centre for carbon storage</i>	10
Figura 4: Esquema del método de captura post-combustión. Fuente: <i>scottish centre for carbon storage</i>	11
Figura 5: Esquema del método de captura Oxyfuel. Fuente: <i>scottish centre for carbon storage</i>	12
Figura 6: Distribución global de ductos de CO ₂ , para la aplicación de CCS. Fuente:(IEAGHG, 2014)	14
Figura 7: Esquema del transporte mar adentro, por medio de embarcaciones. Fuente: u-tokyo.ac.jp	14
Figura 8: Opciones frecuentes de proyectos de CCS. Fuente: CO2CRC	15
Figura 9: Almacenamiento oceánico: Laguna de almacenamiento de CO ₂ y disolución del mismo. Fuente: CO2CRC	17
Figura 10: Esquema metodológico de tesis de proyecto 159-2017 FONDECYT	20
Figura 11: Mapas de las dimensiones contempladas en el Proyecto. Fuente: Sernanp, Perú Petro, MTC, Defensoría del Pueblo.	27
Figura 12: Presentación del taller participativo.	29
Figura 13. Mesas de trabajo establecidas, para la revisión de los mapas elaborados en función de 4 dimensiones.	32
Figura 14: Mapas de los posibles depósitos en Perú, para el almacenamiento geológico de CO ₂ . Fuente: (ANA, Perú Petro)	34
Figura 15. Mapa de depósitos posibles para la inyección geológica de CO ₂ y los criterios de eliminación. Fuente: Sernanp, Perú Petro, USGS 2017.	36
Figura 16. Mapa zonificado con posibles sitios para la inyección y sitios descartados. Lotes petroleros. Fuente: Perú Petro, 2017.	38
Figura 17. Mapa sísmico de las aceleraciones de suelo en el Perú. Fuente: NTE 0.30 Diseño sismo resistente, 2018.	42
Figura 18. Mapa de los lotes petroleros – accesibilidad – Infraestructura vial. Fuente: MTC, Perú Petro, 2017.	43
Figura 19. Mapa de conflictos sociales en el Perú, por departamentos. Fuente: Defensoría del Pueblo, 2016.	44
Figura 20: Mapa de lotes en consideración y centros poblados, a nivel nacional. Fuente: INEI, Perú Petro, 2017.	45
Figura 21. Mapa de sitios potenciales sobre las diferentes cuencas sedimentarias. Fuente: Perú Petro, Sernanp, 2017.	49
Figura 22. Mapa de cuencas sedimentarias en el noroeste peruano con recomendación de posibles zonas de almacenamiento CO ₂ . Fuente: Peru Petro, 2017.....	50
Figura 23. Sección transversal norte – sur de la cuenca de Talara. Fuente: (Higley, 2004) - USGS	51
Figura 24. Columna estratigráfica de la Cuenca Talara. Fuente: (Bianchi, 2002) – INGEPET	52

<i>Figura 25.</i> Mapa de lotes de contrato y pozos exploratorios del noroeste del Perú. Fuente: Perú Petro, 2018.	58
<i>Figura 26.</i> Variación de densidad del CO ₂ con la profundidad. Fuente: Bachu, 2003.	59
<i>Figura 27.</i> Mapa de lotes petroleros considerados para caso de estudio y zonas protegidas, distribuidas a nivel nacional. Fuente: SERNANP y Perú Petro.	61
<i>Figura 28.</i> Mapa de lotes petroleros y restos arqueológicos en Perú. Fuente: Perú Petro y Ministerio de Cultura.	63
<i>Figura 29.</i> Columna estratigráfica de la Cuenca de Trujillo. Fuente: Wine et al, 2000.	66
<i>Figura 30.</i> Mapa de lotes considerados en la Cuenca sedimentaria de Marañón – Ucayali – Madre de Dios y pozos cercanos. Fuente: Perú Petro.	71
<i>Figura 31.</i> Sección transversal de la Cuenca de Marañón, en dirección suroeste – noreste. Fuente: Dan, 2002.	72
<i>Figura 32.</i> Columna estratigráfica generalizada en las cuencas de Marañón, Ucayali y Madre de Dios. Fuente: Mathalone & Montoya, 1995.	73
<i>Figura 33.</i> Mapa de lotes de contrato y pozos exploratorios del Perú. Fuente: Perú Petro, 2018.	77
<i>Figura 34.</i> Lluvia en la selva, noviembre 2018. Fuente: Senamhi.	79
<i>Figura 35.</i> Mapa con orden de preferencias de sitios potenciales para proyectos de inyección geológica de CO ₂ y criterios de evaluación importantes.	93
<i>Figura 36.</i> Documentación que garantiza información entregada a la PUCP.	102
<i>Figura 37.</i> Mapa con acuerdos de los expertos para la evaluación de las zonas potenciales de almacenamiento de CO ₂	105

Listado de acrónimos

CCS: *Carbon Capture and Storage.*

MCDM: *Multicriteria Decision Making.*

Topsis: *Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution.*

Sernanp: Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado.

Cenepred: Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres.

Fondecyt: Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico e Innovación Tecnológica.

Concytec: Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica.

Senamhi: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú.

Ana: Autoridad nacional del agua.

USGS: *United States Geological Service.*

CEPAL: Comisión Económica para América Latina y el Caribe.

COP: *Conference of the Parties.*

1 Introducción

1.1 Antecedentes

Según información del Banco Mundial, el Perú es uno de los países que menos CO₂ emite hacia la atmósfera: dos toneladas métricas per cápita (2014). Asimismo, el país ha aumentado sus valores de emisiones de CO₂ a lo largo de los años: 0.81 toneladas métricas per cápita en 1960 hasta el valor de dos toneladas métricas per cápita, en la actualidad. También, desde 1990 hasta el 2005 el crecimiento del CO₂ emitido por el Perú hacia la atmósfera se dio en un 2.61% (CEPAL, 2009).

Lo descrito anteriormente, supone al Perú como un Estado que no influye considerablemente en la emisión de CO₂ hacia la atmósfera a nivel global. Así, se podría deducir que el aporte peruano al calentamiento global, debido al incremento en la atmósfera de los gases del efecto invernadero, es mínimo y que, en consecuencia, los efectos desfavorables debido al cambio climático no serían de consideración en el contexto del nacional. No obstante, según el Tyndall Center de Inglaterra, el Perú es el tercer país más vulnerable al cambio climático después de Bangladesh y Honduras. Esto se debe a que el país se vería afectado, debido a las inclemencias de la naturaleza, y se generaría un impacto en la integridad de la población, en la salud, en la economía, etc. De igual manera, la tendencia del retroceso y desaparición de los glaciares en los andes se ha acelerado, lo cual implica problemas críticos en cuanto a la disponibilidad de agua dulce en el país (Acquatella, 2008). Más aún, los efectos del cambio climático serían de gravedad en el país, debido a la extrema pobreza en la que se encuentra un gran número de la población.

Es notorio el riesgo que existe en nuestro país, cuando se refiere al cambio climático. Anualmente, las lluvias ocasionan grandes daños en los entornos rurales y urbanos, frecuentemente generando pérdidas humanas en los grupos más vulnerables. También, según el programa *In-Country NAP Support*, figura 1 **Figura 1**, alrededor de seis millones de peruanos están expuestos a fríos extremos: un descenso gradual en la temperatura en estas locaciones podría traer consecuencias severas en la población. Adicionalmente, las pérdidas económicas anuales hasta el año 2025 serían de 9906 millones de dólares. En ese sentido, existe una necesidad de identificar claramente los principales riesgos naturales que existen en el Perú, con la finalidad de diseñar métodos de mitigación apropiados para reducir o

eliminar el riesgo a largo plazo de las personas y propiedades ante las amenazas naturales (Godschalk et al. 1999) al interior del país.

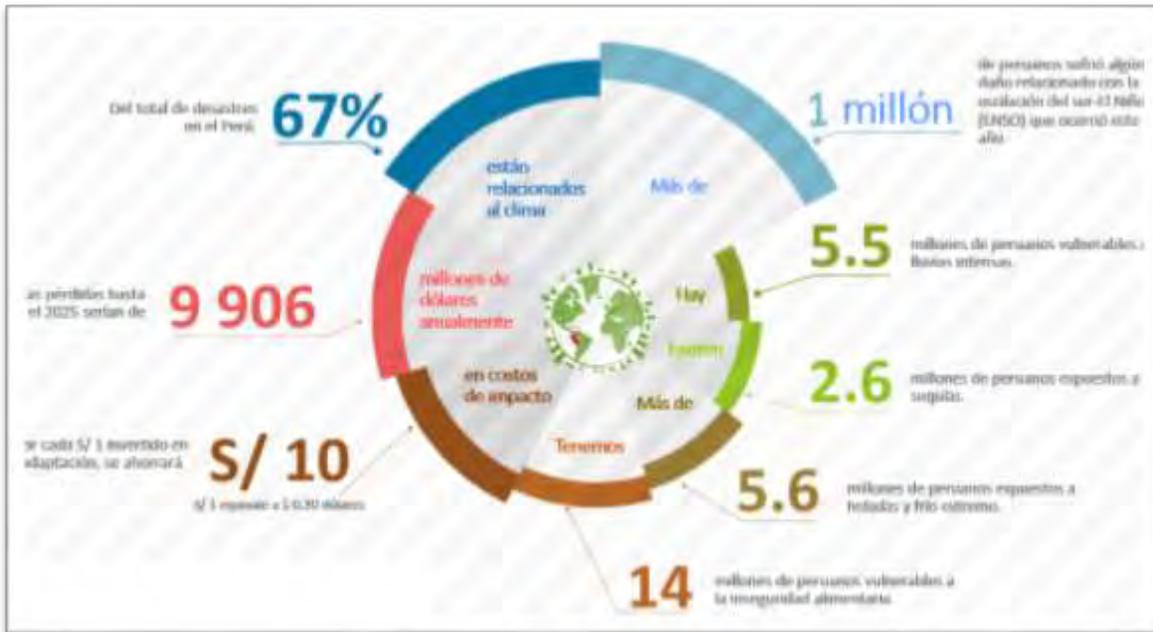


Figura 1: Esquema del impacto del cambio climático en el Perú. Fuente: In-Country NAP Support: Perú – IISD.

En consecuencia, debido al contexto en el cual nos encontramos, se han pactado diferentes objetivos en relación al cambio climático, a nivel mundial. Uno de los acuerdos más relevantes, en la (*Conference of parties*) COP23, desarrollada en Fiji, es el del compromiso de mejorar el acuerdo de París, en cuanto a tecnologías, emisiones de gases del Efecto Invernadero y mitigación del cambio climático. El gran compromiso al que se sometieron los Estados participantes a dicha cumbre es el de mantener la temperatura media mundial por debajo de los 2°C de los niveles preindustriales.

1.2 Justificación

Por lo descrito anteriormente, el Perú tiene la necesidad de tomar acciones para reducir gradualmente sus emisiones de CO₂. Uno de los métodos de mitigación ambiental que actualmente se utiliza a nivel mundial es el de la captura, transporte y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) por sus siglas en inglés. Su aplicación en nuestro entorno supondría

la disminución gradual de emisiones de dicho gas y, probablemente, de manera colateral, una recuperación secundaria de combustibles fósiles como se realiza en países como Estados Unidos, Canadá, Australia, etc.

En virtud de ello, un adecuado análisis multicriterio de diferentes dimensiones como la social, ambiental, geológica, económica etc. permitiría la ubicación de posibles locaciones donde podría desarrollarse el almacenamiento geológico de CO₂ en el Perú.

La importancia sustancial del presente trabajo radica en identificar, a partir de la información científica y pública, un conjunto jerarquizado de posibles locaciones a lo largo del territorio nacional, en los cuales existan las condiciones básicas adecuadas para establecer proyectos de inyección geológica de CO₂ y, de esta forma, ser capaces de responder a la pregunta sustancial: ¿es posible realizar este tipo de proyectos en el Perú de manera económica y segura? Esta investigación marcará la línea base para el desarrollo del Proyecto 159-2017 FONDECYT: Evaluación del Potencial de Desarrollo de Proyectos de Inyección Geológica de CO₂ en el Perú Mediante Opciones Reales. Además, servirá como referente para otras investigaciones alusivas a la toma de decisiones mediante análisis multicriterio.

1.3 Objetivos

El objetivo general del tema de investigación es determinar las posibles zonas del territorio peruano donde se podría desarrollar proyectos de almacenamiento geológico de CO₂.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Revisión y análisis de información relevante existente acerca de los proyectos de inyección geológica.
- Definición de parámetros, criterios y dimensiones: Ejecución de los talleres participativos con panel de expertos, pertenecientes a las áreas afines al proyecto.
- Evaluación del potencial de las zonas dentro del país, donde pueda realizarse la inyección geológica CO₂, mediante la aplicación y desarrollo de técnicas multicriterio.
- Elaboración de mapa del Perú y las locaciones donde podría desarrollarse el almacenamiento geológico de CO₂, de manera jerarquizada.

2 Estado del arte

2.1 Evaluación de dimensiones y variables del análisis multicriterio

Riesgos naturales en el Perú

Los riesgos se generan como consecuencia de la correlación directa de dos factores: el peligro y la vulnerabilidad. Por un lado, el peligro surge como un fenómeno que amenaza una locación determinada. Por otro lado, la vulnerabilidad es una construcción de la sociedad (Lavell, 2000).

En el contexto nacional, los peligros que son de origen natural y generan riesgos naturales varían en función de la ubicación y características geográficas (Cenepred, 2014). Ahora bien, según el Plan Nacional de Gestión de Riesgo de Desastres del Perú, los aspectos más relevantes de los peligros naturales presentes en el país están relacionados con:

- La ubicación del país en el “Cinturón de Fuego del Pacífico”, zona que comprende regiones de elevada actividad sísmica, donde la Tierra libera más del 80% de la energía acumulada en su interior, lo cual produce sismos y actividad volcánica (Tavera, 2014).
- La localización en la zona tropical y subtropical de la costa sudamericana, ya que existe una exposición constante a fenómenos climáticos como, por ejemplo, el Fenómeno del Niño, inundaciones, sequías, etc.
- La presencia de la Cordillera de los Andes en territorio nacional, debido a que define tres áreas geográficas distintas, cada una con diferentes climas y, además, la morfología de la cadena montañosa permite ocasionalmente la ocurrencia de deslizamientos, aludes, aluviones, etc. (Cenepred, 2014)

Asimismo, de acuerdo al Cenepred (2014), la vulnerabilidad está relacionada con la falta de planificación en el Perú, la existencia de poblaciones vulnerables y la práctica inadecuada de autoconstrucción y de precariedad en las edificaciones. En este contexto, según el mapa de vulnerabilidad del Ministerio del Ambiente, 46% del territorio nacional tiene condición de vulnerabilidad alta a muy alta, donde además se localiza aproximadamente 36% de la población. En el marco nacional, se cuenta con las condiciones de vulnerabilidad por exposición a los diferentes peligros como, por ejemplo:

- En el caso de sismos, dado que el país se encuentra en una zona de subducción entre las placas Nazca y Sudamericana, hay una alta ocurrencia de eventos sísmicos. Así, tan solo

Lima y el Callao tienen el 50% de habitantes en alta exposición. Asimismo, 4900 kilómetros de vías y puertos están expuestos ante una alta amenaza sísmica.

- En el caso de inundaciones, debido a la ubicación geográfica, el país está expuesto a peligros de naturaleza hidrometeorológica, los mismos que pueden ocasionar inundaciones en las tres regiones de la nación.
- En el caso de las heladas y friajes, la población rural se ve más expuesta como también sus cultivos y animales. La vulnerabilidad se presenta por una exposición a un gran número de días con temperaturas muy bajas, mayormente en la sierra central y sur.
- En el caso de las sequías, existen diferentes grados de vulnerabilidad principalmente en los departamentos de la sierra centro y sur, así como también algunas vertientes costeras. En las zonas agropecuarias expuestas hay una población aproximada de 2.5 millones de habitantes.

Es a partir de la identificación y análisis de las características de los peligros (factores circunstanciales de las comunidades) y vulnerabilidades (factores propios de las comunidades) que se definen los escenarios de riesgo. En consecuencia, cada uno de estos es un producto dinámico que dependerá de muchos componentes, entre ellos, condición económica, baja resiliencia, susceptibilidad ambiental, etc. (CENEPRED, 2014). La tabla 1 muestra dichos escenarios de riesgo que podrían afectar el territorio y la población en el Perú.

Tabla 1.

Escenarios de riesgo para cada peligro. Fuente: PLANAGERD 2014-2021

Fenómeno	Escenario de riesgo
Bajas temperaturas	Heladas: población principalmente alto andina está expuesta a las heladas de 30 a 365 días, con temperaturas promedio menores a 4°C. Existen alrededor de 1,965,442 habitantes afectados. Los departamentos más afectados por este fenómeno son Puno, Huancavelica y Cusco (Plan Multisectorial ante Heladas y Frijaje, 2016)

	<p>Friaje: población de la selva peruana expuesta al friaje tiene un número de 3,171,106 habitantes. La región más afectada por este fenómeno es Loreto (Plan Multisectorial ante Heladas y Friaje, 2016).</p>
<p>Lluvias intensas: huaycos, inundaciones, deslizamientos</p>	<p>El número de habitantes expuestos a este tipo de fenómenos hidrometeorológicos es de aproximadamente 9,245,028 que representan el 30% de la población nacional</p>
<p>Sismos</p>	<p>La norma E.030, sobre el diseño sísmo resistente, en los parámetros de sitio define la zonificación sísmica en el territorio nacional: Z1, Z2, Z3 y Z4. la zona Z4 es la más expuesta a los impactos de sismos. Esta zona cuenta con aproximadamente 20 millones de habitantes equivalentes al 70% de la población</p>
<p>Sequía</p>	<p>A nivel nacional, 1301 distritos tienen riesgo a sequías: los departamentos con mayor riesgo son Tacna, Lambayeque e Ica</p>
<p>Fenómeno de El Niño</p>	<p>734 distritos afectados con una población de aproximadamente de 7 millones de habitantes (25% de la población). Probabilidad de ocurrencia de huaycos, inundaciones y deslizamientos en 150 distritos. Los departamentos con mayor población expuesta son Piura, Cajamarca, Lambayeque y Ancash.</p>

Heladas y friaje:

Las heladas se refieren al descenso de temperaturas hasta niveles muy severos, mientras que el friaje se debe a los cambios bruscos de temperatura, debido al ingreso de masas de aire frías y secas al área en cuestión (Plan Multisectorial ante Heladas y Friaje, 2016). Las heladas se intensifican en las zonas alto andinas y el friaje se presenta con más frecuencia en las zonas de selva noroccidental del país.

Las heladas y el friaje podrían afectar el funcionamiento de una planta de almacenamiento geológico de CO₂, dado que la temperatura es un factor importante en el transporte e inyección. En el caso de utilizar un sistema de tuberías para el transporte del CO₂ en su estado supercrítico, una condición estable se logra para temperaturas mayores a -60°C y presiones mayores al valor de presión crítica de 7.38 MPa. Sin embargo, para otros medios de transporte como camiones, trenes o buques que mantienen una presión constante, las condiciones del entorno no afectarían la estabilidad del fluido. (Svensson, Odenberger, Johnson, Stromberg, 2004). En el Perú, el valor mínimo histórico de temperatura oscila entre valores de -15°C y -30°C, en promedio, en localidades altas superiores a los 5000 m.s.n.m. entre los meses de julio y septiembre (Clime-data.org, 2014). El mapa de distribución de frecuencias de heladas a nivel nacional se muestra en el Anexo 1. Se deduce que, en el país, existen las condiciones de temperaturas mínimas favorables para el desarrollo de proyectos de inyección geológica de CO₂.

Peligros hidrometereológicos

Los peligros hidrometereológicos representan fenómenos que tienen por origen al agua. Su ocurrencia impacta negativamente en el ámbito social, económico y ambiental, sobre todo en zonas de elevado riesgo. Por un lado, el huaico o flujo de detritos, se define como una corriente de lodo de ocurrencia eventual, que consiste en flujos rápidos o intempestivas avenidas de aguas turbias que arrastran materiales de diferentes tamaños consigo (MINSA, 2011). Por otro lado, una inundación se define como el aumento del agua por arriba del nivel normal del cauce, o el nivel en el cual no se generan daños (OMM, UNESCO, 1974). En el contexto nacional, las zonas más expuestas a inundaciones son aquellas ubicadas en la selva

oriental del país (Loreto y Ucayali) y en la costa norte (Piura), debido a ocurrencia de fenómeno de El Niño, (CENEPRED, 2014). Estos fenómenos pueden amenazar el correcto funcionamiento de los proyectos de almacenamiento geológico de CO₂, debido a que pueden ocasionar fugas de CO₂. Un objetivo asociado a la selección de un sitio adecuado para la inyección de CO₂, es la minimización de riesgos y la protección del reservorio. Un criterio para la definición de dicho objetivo es la reducción de la amenaza de deslizamientos (Grataloup, Bonijoly, Brosse, 2009), producto los fenómenos descritos. En consecuencia, es de carácter significativo tomar en consideración dichos peligros en el desarrollo del proyecto de almacenamiento de CO₂.

Sismos

En el caso de realizar proyectos de inyección geológica, debe considerarse los siguientes factores: 1) si la cuenca sedimentaria donde se proyecta secuestrar el CO₂, es convergente o divergente y 2) las actividades neotectónicas, ya que estas últimas se relacionan a la estructura y tipo de trampa de CO₂, ya sea anticlinal, sinclinal o falla geológica (Llamas, Cienfuegos, 2012). La selección de sitio para la inyección geológica debe comprender diversos objetivos, entre los cuales se encuentra la minimización de riesgos que busca proteger la integridad de reservorio de CO₂, por lo cual es importante identificar amenazas sísmicas en el área de almacenamiento como por ejemplo la presencia de fallas geológicas que afectan la sucesión sedimentaria (Grataloup, Bonijoly, Brosse, 2009). En consecuencia, se debe evitar ubicar proyectos de inyección en zonas donde existen actividades neotectónicas, entre ellos los eventos sísmicos, actividad volcánica, etc., ya que aumenta considerablemente la probabilidad de fugas de CO₂. Es por ello que los parámetros mencionados como fallas geológicas, actividad sísmica son importantes en el desarrollo del proyecto.

En el contexto nacional, por un lado, en el borde occidental del país, se presenta el proceso de convergencia y subducción de la placa Nazca por debajo de la Sudamericana, lo cual genera sismos de diferentes magnitudes y focos, asociados a fricciones y deformaciones de ambas placas (Tavera, 2014). Asimismo, la mayor distribución de sismos superficiales e intensos se presenta en la costa del país. Para el almacenamiento geológico de CO₂, estos

factores deben ser considerados ya que comprenden un criterio técnico para el desarrollo del proyecto de inyección geológica de CO₂.

Población vulnerable

La población vulnerable, según el PLANAGERD, se define como aquella que está expuesta y es susceptible a sufrir perjuicios, debido a la ocurrencia de peligros de origen natural o inducidos por la acción humana (2014). En consecuencia, la población vulnerable a nivel nacional ubica en las categorías de riesgo medio, alto y muy alto. Según Grataloup, Bonijoly, Brosse, el proyecto de inyección geológica de CO₂ debe definir un objetivo que considere aspectos sociológicos y económicos, como por ejemplo el análisis de costos (reuso de infraestructura, nuevas instalaciones, etc.) y la aceptación popular del proyecto (2009). También los criterios para determinar la selección de sitio para el almacenamiento de CO₂ abordan un par de aspectos sociales: la sostenibilidad que en el largo plazo determina la viabilidad (económica ambiental y social) del proyecto. También se debe valorar el medio ambiente y público que define la aceptación social, regulaciones ambientales y actitud de la comunidad (Deveci, Demirel, John, Özcan, 2015). En consecuencia, es importante considerar los aspectos sociales y además se debe tomar en cuenta la alta ocurrencia de conflictos socio-ambientales en el Perú debido a proyectos energéticos, como se observa en la figura 2:



Figura 2: conflictos sociales en el Perú. Fuente: Defensoría del Pueblo (2016)

2.2 Captura, transporte y almacenamiento de CO₂ (CCS)

2.2.1 Captura de CO₂

La primera etapa en un CCS es la captura del dióxido de carbono CO₂. Esta fase contempla la concentración del gas en su estado líquido para su transporte y posterior almacenamiento (Folger, 2009). Se puede identificar 3 fases de la captura del CO₂: pre-combustión, post-combustión y *oxyfuel*. Una vez que el CO₂ es atrapado, debe ser comprimido a una presión de al menos 100 barómetros (Benson & Orr, 2008) para que pueda ser transportado a través de ductos, camiones, buques, etc. hacia la locación de almacenamiento o secuestro geológico. A continuación, se define cada uno de los procesos de captura de CO₂:

Pre-combustión

En este proceso, se separa inicialmente el CO₂ del combustible al combinar este último con vapor y/o agua (Folger, 2009). De esta combinación puede separarse el hidrógeno aplicable en la combustión de la actividad deseada y, por otro lado, el CO₂ en su estado líquido, para ser almacenado a posterioridad.

En términos comerciales, gran parte del CO₂ utilizado es recuperado de industrias de fertilizantes y de producción de hidrógeno. Si bien las primeras etapas de conversión en este método son costosas y complejas, la concentración del CO₂ es adecuada tal que la separación se torna más sencilla (Metz, Davidson, de Coninck, Loos, & Leo, 2005)

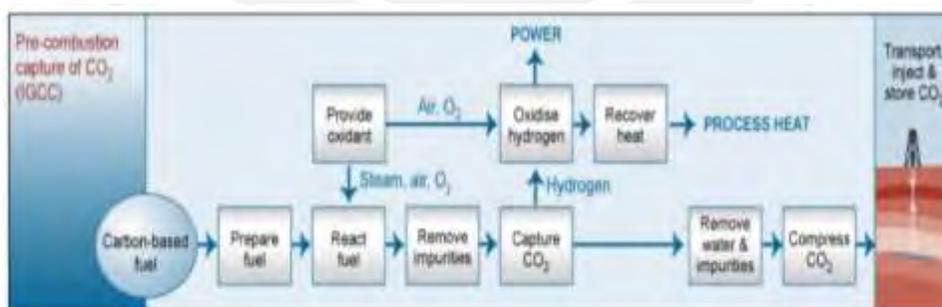


Figura 3: Esquema del método de captura pre-combustión. Fuente: *scottish centre for carbon storage*

La figura 3 presenta un esquema práctico de la metodología pre-combustión. Las etapas relevantes en este implican la adhesión de agua y/o vapor al combustible; el hidrógeno destinado para la energía o poder; y el CO₂ capturado para ser almacenado.

De manera sintetizada, el monóxido de carbono (CO), al mezclarse con H₂O, reacciona y da lugar al hidrógeno y dióxido de carbono, el cual en su estado líquido podrá ser capturado, transportado y almacenado.

Postcombustión

Bajo circunstancias específicas, este método es económicamente factible en algunas industrias, como por ejemplo la producción de urea, bebidas carbonatadas, producción de hielo seco, etc. (Folger, 2009). Básicamente, esta tecnología es empleada para la captura del CO₂ de diferentes gases combustibles aplicados en algunas plantas energéticas (Metz et al., 2005).

El principio químico utilizado en esta metodología es el de la absorción química. El CO₂ es absorbido, en consecuencia, por un líquido solvente al producirse una reacción química. En una planta de captura del CO₂, el gas combustible es transportado a través de una chimenea-columna, en donde el solvente separa el CO₂ del resto de gas combustible. Después, el solvente es ingresado en un horno, el cual es calentado hasta temperaturas de 100-120°C. Es en esta última fase que el CO₂ se libera del solvente en un estado líquido altamente concentrado (99%) (Herzog & Golomb, 2004) . Finalmente, el CO₂ puede ser comprimido para su transporte y almacenamiento, mientras que el solvente utilizado es enfriado y derivado a la columna de absorción.

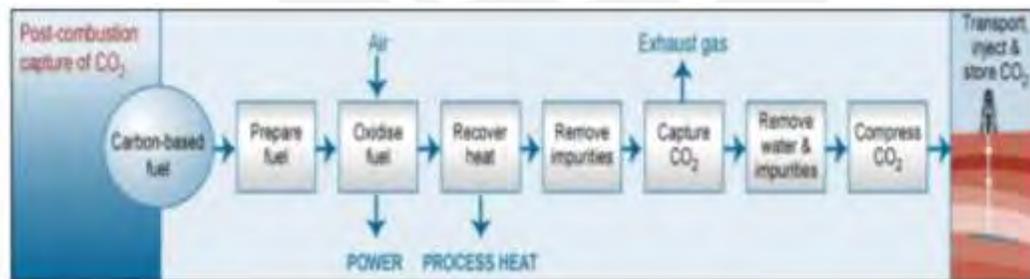


Figura 4: Esquema del método de captura post-combustión. Fuente: *scottish centre for carbon storage*

En el gráfico expuesto, puede apreciarse claramente la continuidad del método, en el cual, a diferencia del método pre-combustión, no se utiliza vapor y/o agua sino un solvente. El grupo de solventes o absorbentes más utilizado es el de aminas y ,específicamente, el más utilizado es la monoetanolamina (Wang, Lawal, Stephenson, Sidders, & Ramshaw, 2011)

Oxyfuel

Este método es desarrollado en menor medida a diferencia de los 2 expuestos anteriormente: todavía se encuentra en la fase experimental o de demostración (Metz et al., 2005). Está caracterizado fundamentalmente por la aplicación de oxígeno de alta pureza, en lugar de aire. De la misma manera, se obtendrán altas concentraciones de CO₂ y, en consecuencia, una mayor facilidad de separación del mismo, aunque esto implique una mayor inversión económica y energética.

Esta fase se encuentra aún en desarrollo, ya que, para poder originar la combustión a partir de oxígeno, son necesarias temperaturas de al menos 3500°C. Este valor es elevado en comparación de las plantas típicas de energía. Inicialmente, se separan contaminantes comunes del gas combustible como SO₂, NO_x, etc. En consecuencia, el gas resultante puede ser destinado a la caldera para controlar las altas temperaturas, mientras que el gas restante en dicho proceso, puede ser purificado, comprimido y capturado (Folger, 2009).

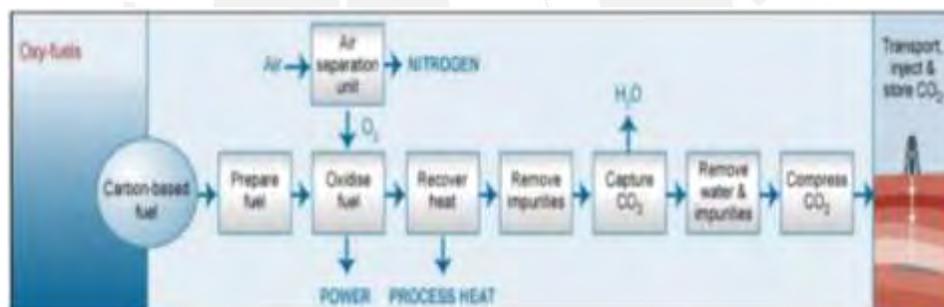


Figura 5: Esquema del método de captura Oxyfuel. Fuente: *scottish centre for carbon storage*

2.2.2 Transporte de CO₂

En la actualidad, existen al menos 6500 km de tuberías o ductos para el transporte de CO₂ tanto en superficie como mar adentro, de los cuales un gran porcentaje se utiliza para la implementación del *EOR*, en Estados Unidos (Bui, M., Adjiman, C., Anthony, E. et al, 2018). El transporte de CO₂ es una fase que se desarrolla entre las etapas de captura y almacenamiento. El CO₂ es trasladado desde la planta de captura determinada hacia el sitio de almacenamiento mediante ductos, embarcaciones y vehículos terrestres de gran carga. La elección del método de transporte a utilizarse está en función, principalmente, de la distancia entre fuente y sitio de almacenamiento. El medio de transporte más utilizado para transportar

el CO₂ largas distancias es a través de ductos (IPCC, 2005). El éxito de los métodos de CCS en la reducción de emisiones de CO₂, a gran escala, dependerá de la implementación efectiva de la infraestructura (Kubby, Middleton, Bielicky, 2011), sobre todo aquella que corresponda al transporte del CO₂ en su estado líquido. Aunque se pueda optar también por el uso de barcos o vehículos terrestres para su transporte, estos medios no son tan eficientes cuando se quiera trabajar en grandes proyectos de secuestro geológico (Folger, 2009). Por otro lado, un sistema válido y utilizado, pero optado con menos frecuencia en el transporte de CO₂ es a través de las embarcaciones. En ese sentido, los modos de transporte del CO₂ son como se muestra a continuación:

- **Transporte a través de ductos**

Es de vital importancia que el transporte de CO₂ sea efectivo, económico y seguro. Actualmente, el método de transporte más usado para el CCS implica el uso de ductos que abarcan largas distancias. Esta es una de las opciones más aplicadas y, por lo tanto, para desarrollar operaciones seguras a gran escala, se debe optar por un monitoreo constante y, además, evitar peligros, como por ejemplo la corrosión interna en las tuberías (Cole, Corrigan, Sim, 2011). En este método de transporte, una corriente de CO₂ es normalmente bombeada a una presión mayor a 8 MPa, ya que la densidad del CO₂ aumenta y consecuentemente se evita regímenes de flujo en dos fases (Y. Tan et al., 2016). En ese sentido, los requerimientos del diseño del sistema de ductos se encuentran en función del ratio de flujo de CO₂ y de las respectivas propiedades hidrodinámicas del flujo del CO₂ en su estado supercrítico como la densidad, compresibilidad y viscosidad (Bui, M., Adjiman, C., Anthony, E. et al. 2018).



Figura 6: Distribución global de ductos de CO₂, para la aplicación de CCS. Fuente:(IEAGHG, 2014)

- **Transporte a través de embarcaciones**

Por lo general, las embarcaciones marítimas sirven para el transporte del CO₂ capturado hacia las locaciones *Offshore* donde se realizará el almacenamiento geológico de CO₂.

El transporte basado en este método permite integrar la de emisión de CO₂ y la locación del almacenamiento geológico sin que estén limitados a una sola posible coincidencia sumidero – fuente (ductos). (Ozaki, Ohsumi, Kajiyama, 2013). También, este método implica que no se construya infraestructura que abarque ductos mar adentro y costeros, donde naturalmente las actividades económicas basadas en la pesca suelen ser altas. En la figura 7 se muestra un esquema básico del método de transporte descrito:

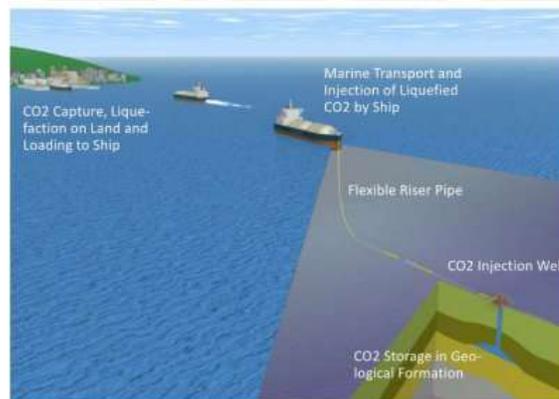


Figura 7: Esquema del transporte mar adentro, por medio de embarcaciones. Fuente: u-tokyo.ac.jp

2.2.3 Almacenamiento de CO₂

Esta es la última etapa del método CCS. Es de gran relevancia, ya que una fuga del CO₂ concentrado podría traer consigo consecuencias ambientales lamentables. En la actualidad se cuenta con 2 métodos de almacenamiento de CO₂: almacenamiento o secuestro geológico de CO₂ en formaciones profundas y almacenamiento de CO₂ oceánico. Se muestran dichos métodos a continuación:

- **Almacenamiento o secuestro geológico de CO₂ en formaciones profundas**

Una vez que el CO₂ ha sido capturado y transportado a las locaciones de almacenamiento geológico, puede ser bombeado a pozos profundos como por ejemplo depósitos vacíos o con poca reserva de petróleo o gas, yacimientos de carbono no explotables (Benson & Orr, 2008), formaciones salinas profundas, etc.

A continuación, se muestra un gráfico que contiene las aplicaciones más comunes del CCS.

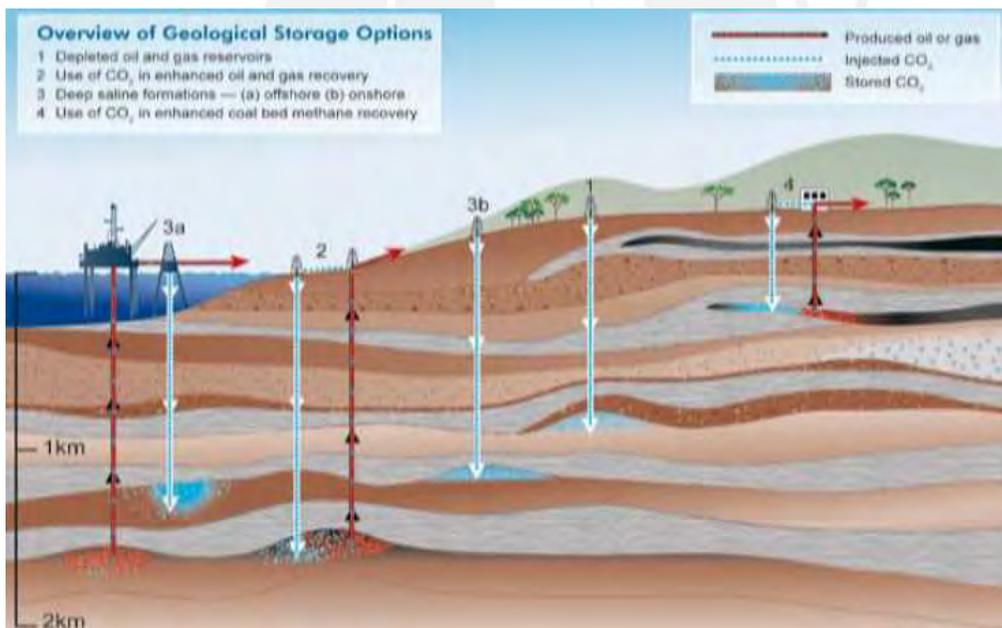


Figura 8: Opciones frecuentes de proyectos de CCS. Fuente: CO2CRC.

Tal como lo muestra la figura 8, una de las aplicaciones más frecuentes del CCS es el de la recuperación asistida de gas o petróleo, *EOR* por sus siglas en inglés. Muchos proyectos comerciales utilizan la tecnología mencionada (Bui et al., 2018). Por otro lado, debe

inyectarse el CO₂ a una profundidad mayor a los 800 metros para que las altas presiones mantengan lo mantenga en su estado líquido y, asimismo, exista menos probabilidades de fuga (Folger, 2009).

Los requerimientos para el secuestro geológico de CO₂ son similares a las condiciones de reservorio del petróleo. Así, es necesario que la presión del pozo de inyección sea mayor a la del reservorio (Bjørlykke, 2015). Por otro lado, según el mismo autor, debido a que la densidad del agua es mayor que la del CO₂ secuestrado, este último tenderá a migrar hacia la superficie: es necesaria una capa-roca o sello. En ese sentido, las formaciones geológicas donde se almacenará el CO₂ son principalmente capas llenas de rocas sedimentarias, capaces de acumular miles de metros de sedimento. Los espacios porosos, en estas rocas, son ocupados por agua salada, gas o petróleo. Las formaciones rocosas en capas sedimentarias consisten en capas alternativas de areniscas, arcillas, limos, carbonatos, etc. Así, la capa de areniscas provee espacio de almacenamiento, mientras que las capas de arcilla y limo proveen la capacidad de confinamiento que puede atrapar compuestos tales como gas, petróleo y CO₂ durante millones de años (Benson & Orr, 2008). A lo largo de cientos de años, se espera que el CO₂ sea atrapado en estas formaciones, que reaccione con las rocas sedimentarias y que se transforme en grupos de carbonatos tales como carbonato de calcio (CaCO₃), carbonato de magnesio (MgCO₃), carbonato de hierro (FeCO₃), entre otros. (Metz et al., 2005)

- **Almacenamiento de CO₂ oceánico**

El almacenamiento oceánico de CO₂ es otro método de secuestro. El CO₂ comprimido es transportado desde la fuente de emisión vía embarcaciones o tuberías hasta la locación de almacenamiento. El CO₂ puede ser inyectado a través de un difusor para acelerar la disolución en la columna de agua. También, el CO₂ puede ser bombeado hacia lagos en el fondo marino.

A profundidades mayores a 350 metros, el CO₂ forma un clatrato sólido que es más denso que el agua marina. Sin embargo, este se disuelve en su contexto de manera relativamente rápida (Benson & Orr, 2008). Para que se puedan formar lagos estables de CO₂ comprimido en el fondo del mar, se necesita por lo menos 3km de profundidad, ya que, de otra manera, este retornaría rápidamente a la atmósfera. Asimismo, el almacenamiento oceánico de CO₂ aún se encuentra en sus fases tempranas de desarrollo. (Bui et al., 2018). Sin embargo, a pesar

de la validez de este método, existe preocupación y opinión pública desfavorable, dado el impacto negativo biológico en el que se incurre.

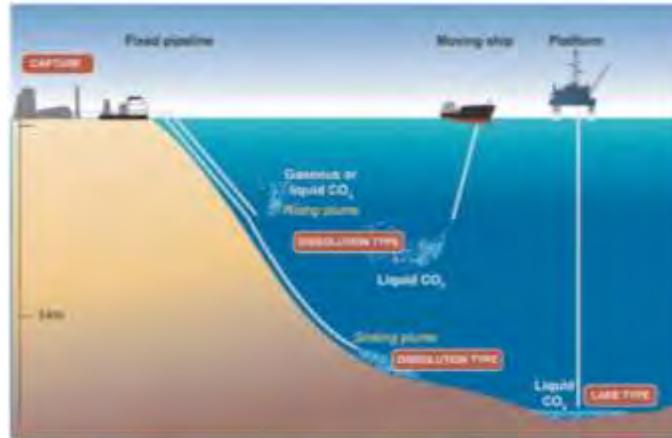


Figura 9: Almacenamiento oceánico: Laguna de almacenamiento de CO₂ y disolución del mismo.

Fuente: CO2CRC

2.3 Análisis multicriterio

El problema inicial del método de captura, transporte y almacenamiento de CO₂ (CCS) es la selección de la mejor locación para la inyección del CO₂ en su estado supercrítico. La elección de sitio para su almacenamiento es un problema de decisión de análisis multicriterio (Firtina Ertis, 2018). Los criterios involucrados en dicho análisis pertenecen a diferentes contextos como el geológico, económico, ambiental, logístico, social, etc.

En el mundo, se desarrollan diferentes metodologías para la selección de sitio para proyectos de inyección geológica de CO₂. En Francia, por ejemplo, el proyecto PICOREF, en la cuenca de París, desarrolló una metodología que consistió en la identificación de criterios de descarte “*killer criteria*” y de criterios de calificación de sitio, cuyo análisis y combinación permitieron establecer locaciones potenciales y las más apropiadas (Grataloup et al., 2009). Además, en Turquía, Deveci, Çetin, John y Özcan estudiaron el desempeño de los métodos TOPSIS, ELECTRE y VIKOR para determinar la locación de sitio en proyectos CCS (2015). Las conclusiones del estudio señalaron que los 3 métodos indicados obtuvieron resultados similares en la definición de sitio. En consecuencia, y en un marco global, cualquiera de los

métodos descritos podría utilizarse para la selección de ubicación para la inyección geológica de CO₂.

Adicionalmente, para desarrollar una buena selección de sitio para la inyección geológica de CO₂, Llamas y Cienfuegos propusieron criterios, tanto técnicos como sociales, que deben tomarse en consideración y, que al momento de su evaluación minimizan el riesgo inherente de la exploración geológica (2012).

Tabla 2:

Valores para criterios técnicos. Fuente: Llamas & Cienfuegos, 2012.

Nivel		I	II	III	IV	V
Criterio						
Valor matemático		1	3	5	7	9
Tectónica, estructural	Geo-mecánica		Dominio inestable		Dominio estable	
	Continuidad lateral	Cuencas convergentes. Actividad volcánica	Cuencas convergentes. Actividad neotectónica		Cuencas divergentes	
			Sinclinal		Horizontal o sub horizontal	Anticlinal
	Fracturas		Muy fracturado. Muchas fallas		Pobremente fracturado. Pocas fallas	
Almacenamiento	Porosidad (%)	<10		10-25		>25
	Permeabilidad	< 1 mD		1-100 mD		>1 D
	Espesor		<10	10-100		>100
	Litología		Otros		Carbonatos	Arenizas
Sello	Plasticidad	Frágil		Intermedio		Dúctil
	Espesor	<10		Región activa 10-100	Región estable 10-100	>100
	Porosidad (%)	>10		10-5		<5
Hidrogeología	TDS	<3000		3000-10000 >260000		>10000
	Hidro-dinámica	Local < 100 años		Área 100-1000 años		Regional >1000 años
	Profundidad (m)	<600		600-900	>2000	900-2000
	Temperatura		Cuenca caliente	Cuenca templada	Cuenca fría	

	Capacidad (Mt CO2)	<10	10-50	50-100	100-150	>150
Otras formaciones	Gas o petróleo		No	Sí, pequeño volumen	Sí. Volumen medio	Sí. Gran volumen
	Betas de carbono		No	Sí. Sin presencia de metano	Sí; profundidad > 800m	Sí; profundidad 200-800m
	Masivo salino		No	Domos	Betas	
	otros	Exploración		Evidencia. Exploración o permisos de investigación		Permisos de Explotación

Tabla 3:

Valores para criterios socio-económicos. Fuente: Llamas & Cienfuegos, 2012.

Nivel		I	II	III	IV	V
Criterio		I	II	III	IV	V
Valor matemático		1	3	5	7	9
	Calidad de la información	Sin data. No es posible hacer ninguna interpretación geológica	Poca data. Es posible hacer una interpretación basada en regiones adyacentes	Data detallada y suficiente profundidad. Data general o superficial	Data regional digital (GIS)	Data detallada (GIS), basada en data de profundidad (pozos y sísmica)
	Distancia (km)	>250	250-100	100-50	50-25	<25
	Calidad del CO2	Contenido de impuridad mayor al 2%		Contenido de impuridad entre 1 y 2%		Contenido de impuridad menor al 1%
	Población (km)	<10	10-25 topografía desfavorable	10-25 topografía favorable	25-50	>50
	Recursos ambientales	0		10-20		>20
	Recursos culturales	0		10-20		>20
	Locación		<i>Offshore</i> (profundo)	<i>Offshore</i> (superficial)	<i>Onshore</i>	
Madurez	Clima		Extremo		Cálido	
	Infraestructura afectada		Ninguna	Poca		Toda
	Nueva infraestructura		Toda	Poca		Ninguna

La evaluación de parámetros de diferentes sitios potenciales, según cada criterio descrito en la tabla 2 y tabla 3, permite establecer un orden de preferencias en el momento de la elección de la mejor ubicación para la inyección geológica de CO₂. Así, los autores de dichas tablas valoran las características de cada criterio en una escala impar del 1 al 9, en la cual 1 representa el escenario menos favorable y 9 representa el más óptimo. La mejor elección supondría aquella que presente la mayor valoración en sus parámetros.

3 Metodología

El presente trabajo de investigación titulado Análisis Multicriterio para la Ubicación de los Posibles Proyectos de Inyección Geológica de CO₂ en el Perú forma parte de la etapa inicial del Proyecto FONDECYT 159-2017: Evaluación del Potencial de Desarrollo de Proyectos de Inyección Geológica de CO₂ en el Perú Mediante Opciones Reales. Este último comprende una investigación multidisciplinaria compuesta por docentes investigadores y alumnos de pregrado y maestría de la Pontificia Universidad Católica del Perú. El esquema que representa la metodología del trabajo de investigación desarrollado se presenta en la

Figura 10:

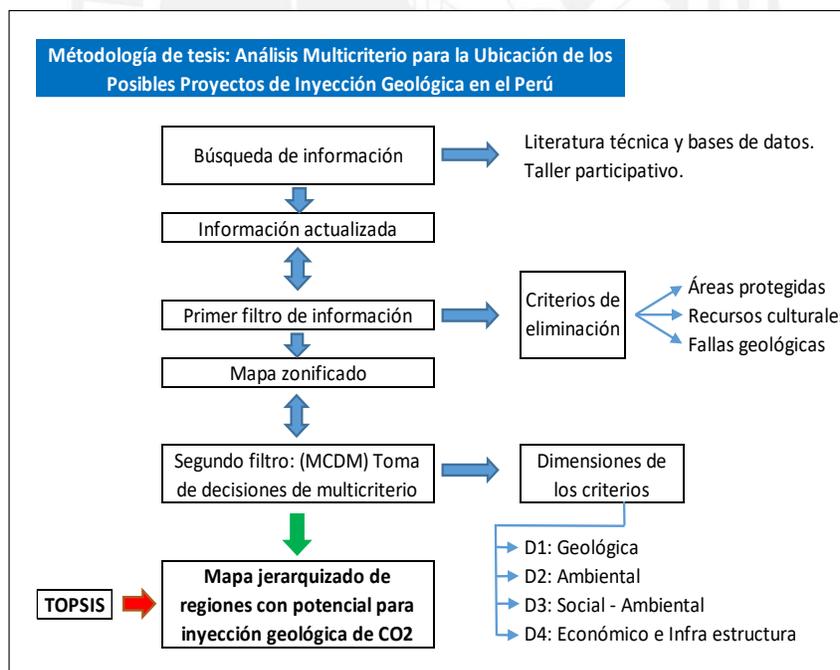


Figura 10: Esquema metodológico de tesis de proyecto 159-2017 FONDECYT

La primera etapa consiste en la búsqueda de información. La búsqueda se realiza en publicaciones o *papers* indexados repositorios científicos como *ResearchGate*,

ScienceDirect, Springer, entre otros. de Según Llamas y Cienfuegos, la colección de información es independiente en cada país o región. Además, esta debe incluir información existente de registros geológicos, pozos existentes para la exploración de gas o petróleo, recursos hídricos, actividades mineras, etc. Asimismo, la data obtenida puede ser complementada con evaluaciones académicas variadas como proyectos de tesis universitarios de postgrado y artículos científicos (2012), tal como lo desarrolla el presente proyecto.

La información, alusiva a los criterios del proyecto se establece en diferentes dimensiones importantes, dentro del contexto nacional. Para la validación y valoración de la relevancia de la data obtenida, se desarrolla un taller en el cual participarán expertos en las áreas alusivas al proyecto que gracias a su experiencia y campo profesional podrán aportar al desarrollo del mismo. Se toma como referencia trabajos previos de los investigadores basados en la investigación-acción participativa. Este tipo de investigación surge con el fin de superar las “limitaciones de los métodos cuantitativos” para entender la “realidad compleja” y para “que pueda ser utilizada como base para la elaboración de políticas y programas de desarrollo con fin de justicia social”. Se parte de la premisa de que el “conocimiento relevante es aquel que se construye en un proceso cooperativo que busca la transformación social” (Damonte y García, 2016).

Es debido a dicho taller que la data con la que se cuenta inicialmente se confirma, actualiza o desprecia, mediante un primer filtro de información, figura 10. Según Grataloup, Bonijoly, Brosse, Dreux, la posible selección de sitio para la inyección geológica de CO₂ debe comprender diferentes objetivos, entre los que se encuentran la optimización de almacenamiento del CO₂; la minimización de riesgo; el respeto de regulación o restricciones espaciales y la consideración de aspectos sociales y económicos. Cada uno de estos objetivos contiene criterios que pueden definirse como criterios de calificación de sitio y criterios de eliminación. Estos últimos descalifican la posibilidad de desarrollar proyectos de inyección geológica en las áreas de estudio donde se presentan (2009). En ese sentido, el taller participativo permitirá establecer los criterios de eliminación, en función de cada dimensión considerada para el proyecto de inyección geológica de CO₂, de manera preliminar.

A partir de la determinación de los criterios de eliminación se prosigue con el segundo filtro de información, el cual es la toma de decisiones a partir de un análisis multicriterio *MCDM*, por sus siglas del inglés. Debido a que la forma en cómo implementar proyectos de inyección geológica de CO₂ es complicada, estimar sus implicaciones ambientales, sociales y económicas, etc. es importante al evaluar su efectividad como una opción de mitigación. Entonces, la implementación de decisiones puede apoyarse en el uso de herramientas de análisis de decisiones multicriterio (Humphries, Pelot, 2014). El análisis multicriterio abarca una variedad de técnicas de evaluación no monetarias que comparten un mismo contexto, mediante el cual diferentes alternativas son ponderadas respecto de una serie de criterios, al asignárseles pesos o niveles de importancia (Gough & Shackley, 2006). Así, se desarrolla un *ranking* de alternativas o criterios mediante el método “fuzzy TOPSIS”, cuya lógica implica la distancia de los positivos y negativos ideales hacia los criterios en cuestión, para lograr un *ranking* de alternativas que considerarán en el desarrollo del proyecto. (Deveci, Demirel, John, & Özcan, 2015).

3.1 Búsqueda de información.

El método de Captura, Transporte y Almacenamiento (CCS) es aplicado en diversos emplazamientos a nivel global. En Sudamérica, a la fecha, existen escasos proyectos de CCS, (Scottish Carbon Capture and Storage, 2016). En el Perú, aún no se ha ahondado en proyectos relacionados al CCS, como medida de mitigación ambiental. En consecuencia, la información que se selecciona es en su mayoría relacionada a otros contextos. Así, la selección de información se realiza a partir de publicaciones o *papers* indexados, publicados en buscadores científicos. Por otro lado, para el desarrollo del taller participativo de expertos y del análisis multicriterio, se utiliza información, de libre disponibilidad, proveniente del sector público y privado. Asimismo, los reservorios adecuados para la inyección de CO₂ abarcan reservorios en explotación o agotados de petróleo o gas, acuíferos salinos y minas subterráneas de carbón. En ese contexto, dado que la mayoría de información requerida no se encuentra de manera pública, debe solicitarse información tanto a empresas privadas como también a instituciones públicas.

3.2 Primer filtro de información

En una primera instancia, a partir de la información que debe recopilarse, se establecerán los posibles reservorios donde se podría desarrollar proyectos de almacenamiento geológico de CO₂. Posteriormente, de manera preliminar, se fijarán los criterios de eliminación, *killer criteria*, que descartan por completo la posibilidad de ubicación de algún proyecto de CCS en un área específica. Dichos criterios comprenderán, por ejemplo, la existencia de áreas de interés nacional, departamental o privada protegida, reserva natural, etc., ya que representan zonas intangibles dentro del país.

3.3 Primer taller participativo

Se desarrollará un primer taller participativo, en el cual concurrirán miembros expertos en diversas áreas relacionadas al presente proyecto de investigación. Los invitados serán tanto académicos como también profesionales en sus respectivos rubros que puedan aportar significativamente al proyecto.

En el taller, se expondrá la metodología y objetivos del proyecto 159-2017 FONDECYT. También, se conformarán diferentes grupos constituidos por distintos expertos, para que puedan discutir y elaborar una idea general sobre el tema a tratar.

Finalmente, cada uno validará y evaluará los criterios con los que se cuentan. Se desarrollará el método Delphi que pretenderá resaltar las convergencias en las opiniones de los expertos y de manera general tratar el contexto del proyecto como un todo. Este trabajo permitirá asignar pesos o ponderaciones a cada uno de los criterios para que después pueda desarrollarse una toma de decisiones a partir de un análisis multicriterio (MCDM) mediante la técnica del orden de preferencia por similitud a la solución ideal (TOPSIS).

3.4 Segundo filtro de información: MCDM a partir de TOPSIS

Mediante la aplicación de la técnica del orden de preferencia por similitud a la solución ideal TOPSIS, se proseguirá a desarrollar un proceso de toma de decisiones por análisis multicriterio.

Esta técnica permite que los responsables en la toma de decisiones organicen los problemas que deban resolverse, lleven a cabo un análisis, realicen comparaciones y rangos de alternativas, para finalmente seleccionar la mejor opción (Hsu-Shih, Huan-Jyh, E. Stanley,

2006). Este método considera simultáneamente la solución ideal positiva y la ideal negativa. La mejor solución asociada a TOPSIS es aquella que se encuentra más cerca a la solución ideal positiva y más alejada de la solución ideal negativa.

Estos criterios, que comprenderán diferentes dimensiones que se elegirán en base de la literatura técnica, ya habrán sido validados, verificados y evaluados en el taller participativo. Una vez desarrollada esta herramienta, se obtendrá un *ranking* de las opciones (reservorios) tomados en cuenta para el establecimiento de proyectos de inyección geológica de CO₂ en el Perú. Finalmente, se elaborará un mapa del Perú con los sitios seleccionados, donde se mostrarán de manera jerarquizada. Este procedimiento se desarrollará en las siguientes etapas:

- Definición de la matriz de decisión: en función de conjuntos de alternativas, criterios y sus respectivos pesos.
- Definición de la matriz decisión normalizada, donde cada valor tiene la forma r_{ij} y se determina como $r_{ij} = \frac{f_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J f_{ij}^2}}$, $j = 1, \dots, J$; $i = 1, \dots, n$
- Cálculo de la matriz de decisión normalizada ponderada: se pondera cada valor en su criterio respectivo. El valor resultante v_{ij} se calcula como $v_{ij} = w_i r_{ij}$, $j=1, \dots, J$; $i=1, \dots, n$, donde w_i es el peso del criterio i y además $\sum_{i=1}^n w_i = 1$.
- Determinación de la alternativa ideal positiva y negativa. Representadas por los valores A^* y A^- , respectivamente, se determinan como

$$\begin{aligned}
 A^* &= \{v_1^*, \dots, v_n^*\} \\
 &= \{(max v_{ij} | i \in I'), (min v_{ij} | i \in I'')\} \\
 A^- &= \{v_1^-, \dots, v_n^-\} \\
 &= \{(min v_{ij} | i \in I'), (max v_{ij} | i \in I'')\}
 \end{aligned}$$

Donde I' está asociado con un criterio favorable e I'' está asociado con un criterio desfavorable.

- Cálculo de la separación de las medidas de distancia, en función de la distancia euclidiana. Se determina las distancias entre las alternativas presentes y las soluciones ideales y negativas.

La separación entre cada alternativa y la solución ideal está representada por

$$D_j^* = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^*)^2}, \quad j = 1, \dots, J$$

La separación entre cada alternativa y la solución negativa está representada por

$$D_j^- = \sqrt{\sum_{i=1}^n (v_{ij} - v_i^-)^2}, \quad j = 1, \dots, J$$

- Cálculo de la proximidad relativa a la solución ideal: la proximidad relativa de la opción a_j con respecto a A^* está definida por

$$C_j^* = \frac{D_j^-}{D_j^* + D_j^-}, \quad j = 1, \dots, J$$

Establecimiento del orden de preferencias: la opción cuyo valor del coeficiente C_j^* sea más cercano a la unidad será la mejor opción en el caso de estudio presente.

3.5 Segundo taller participativo

El segundo taller participativo se caracterizará por desarrollarse en la región donde se establezca, de manera preliminar, él o los sitios más adecuados para la inyección geológica de CO₂. Se pretende que agentes relacionados a las ciencias y a entidades vinculadas al proyecto participen de manera conjunta para que logren validar, apoyar o aportar desde sus diferentes perspectivas técnicas y profesionales. Este taller representará un estado de madurez más avanzado del proyecto de investigación.

4 Desarrollo, análisis y discusión de resultados

4.1 Literatura técnica.

La información necesaria para el desarrollo del proyecto de investigación se descargó de buscadores científicos reconocidos. Las áreas de interés en las que se investigó más fueron las de *Carbon Capture and Storage* (CCS), análisis multicriterio y TOPSIS. En este contexto, para evaluar a los diferentes reservorios, se recopiló información, en su mayoría de origen público. Así, se obtuvo data como, por ejemplo:

- Fallas geológicas: información en formato “shp” recopilada del INGEMMET (Instituto Nacional Geológico Minero y Metalúrgico).
- Mapa Sísmico del Perú: en formato “shp” recopilado del IGP (Instituto Geofísico del Perú)
- Límites políticos regionales, nacionales e internacionales: información en formato “shp” recopilada del IGN (Instituto Geográfico Nacional).
- Puertos, Muelles, Red Vial Nacional, Red Vial Departamental y Línea Férrea: Data en formato “shp” recopilada el MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones).
- Líneas del Gasoducto y Oleoducto peruano: Información en formato “shp” recopilada de Perú – Petro.
- Restos arqueológicos: información en formato “shp” recopilada del Ministerio de Cultura del Perú.
- Centros poblados: información en formato “shp” recopilada del INEI (Instituto Nacional de Estadística e Informática).
- Conflictos sociales: información gráfica recopilada de la Defensoría del Pueblo del Perú.
- Ríos principales, lagos y lagunas: información en formato “shp” recopilada del IGN (Instituto Geográfico Nacional).
- Áreas nacionales protegidas y zonas de amortiguamiento: Información en formato “shp” recopilada del SERNANP (Servicio Nacional de Áreas naturales Protegidas).
- Lotes petroleros (2017) y convenios de evaluación técnica: información en formato “shp” recopilada de los buscadores públicos de Perú Petro. Adicionalmente, se procedió a la solicitud formal de información específica sobre diferentes parámetros, del criterio

geológico, de los lotes que fueron priorizados en el transcurso del desarrollo del proyecto (Anexo: documento GGRL-TERI-GFD-067-2018)

4.2 Primer filtro de información

En función de la literatura técnica y de los archivos de sistema de información geográfica (SIG) hallados, se elaboraron 4 mapas del Perú. Cada uno de ellos representa las diferentes dimensiones que se consideran para el proyecto: geológica; ambiental; social y económica – infraestructura logística existente. Los criterios de eliminación encontrados están representados por las áreas nacionales protegidas, zonas de amortiguamiento, existencia de restos arqueológicos, entre otros. Así, como se observa en la figura 11, se indican los mapas, con cada una de las dimensiones mencionadas:

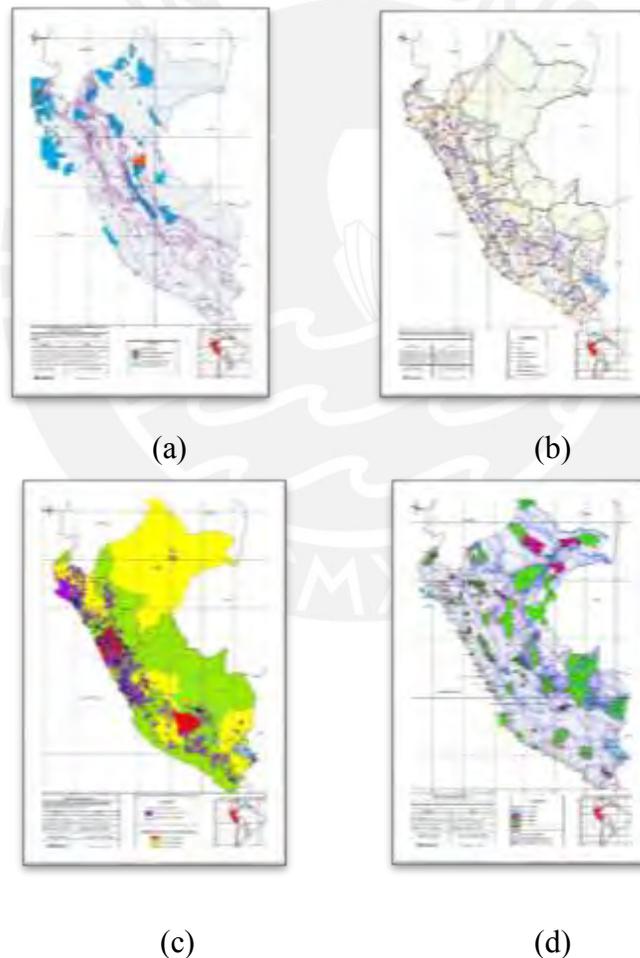


Figura 11: Mapas de las dimensiones contempladas en el Proyecto. Fuente: Sernanp, Perú Petro, MTC, Defensoría del Pueblo.

- **Dimensión geológica:** está representada por la figura 11 (a). En ella, el criterio de eliminación que se contempla está referido a la presencia de fallas geológicas.
- **Dimensión Económica – Infraestructura Logística Existente:** Esta dimensión está representada por la figura 11 (b). En ella, se resalta la presencia de puertos, aeropuertos, carreteras departamentales, carreteras nacionales, gasoducto y oleoducto. Este tipo de infraestructura debe tomarse en consideración en los proyectos de inyección geológica de CO₂, ya que conforma un aspecto importante en el transporte de CO₂ y, así, en el aspecto económico.
- **Dimensión Social:** esta dimensión está representada por la figura 11 (c). En ella, los conjuntos de información analizados, están representados por la existencia de restos arqueológicas, centros poblados y presencia de conflictos sociales en cada región.
- **Dimensión Ambiental:** esta dimensión está representada por la figura 11 (d). Los conjuntos de información competentes están representados por la presencia de áreas naturales protegidas, zonas de amortiguamiento, reservas nacionales, ríos, lagunas, etc. En esta dimensión, los criterios de eliminación están conformados principalmente por las áreas protegidas que configuran zonas intangibles.

4.3 Taller participativo

A través del primer taller participativo, realizado con expertos en cada área, se aportaron nuevos enfoques al análisis multicriterio para la ubicación de posibles proyectos de inyección o secuestro geológico de CO₂ en el Perú. El jueves 24 de mayo del 2018 se desarrolló, en la Pontificia Universidad Católica del Perú (PUCP), el Taller Participativo para la Ubicación de las Posibles Áreas para el Desarrollo de Proyectos de Inyección Geológica de CO₂ en el Perú. El taller forma parte del Proyecto 159-2017 FONDECYT, titulado Evaluación del Potencial de Desarrollo de Proyectos de Inyección Geológica de CO₂ en el Perú Mediante Opciones Reales. El equipo de investigación responsable del taller estuvo liderado por la doctora Sandra Santa Cruz, doctora Noelia Valderrama y doctor Alexis Dueñas, ambos docentes investigadores de la PUCP.

El taller tuvo como objetivos dar a conocer el proyecto de investigación a los posibles entes y/o representantes interesados en el tema; verificar la información, metodología y criterios, mediante el método de panel de expertos Delphi, para la ubicación de posibles zonas para el desarrollo de proyectos de inyección geológica de CO₂ en el Perú, y, finalmente, generar vínculos que permitan compartir información necesaria afín al proyecto y los resultados del mismo. En ese sentido, se contó con la participación de especialistas en áreas como Geología, Ingeniería Geo-mecánica, Ingeniería Civil, Ingeniería del Petróleo, Hidrología, Medio Ambiente y Geografía. Durante el taller, se debatió y validó información relevante para determinar las zonas posibles donde se podría desarrollar proyectos de inyección geológica de CO₂ dentro del Perú. Las variables discutidas abarcan dimensiones como la geológica, ambiental, social y económica – infraestructura logística. Los resultados del método Delphi desarrollado durante el taller se muestran en el ANEXO.



Figura 12: Presentación del taller participativo.

El taller dio inicio con las presentaciones, acerca el proyecto, de los investigadores principales citados previamente. Después de las exposiciones realizadas, el panel de expertos formuló preguntas que fueron correctamente respondidas por el grupo de investigadores. Finalmente, se establecieron mesas de trabajo conformados por especialistas en diferentes

áreas. Se buscó una distribución equilibrada de especialidades en cada grupo de trabajo, para que se generen posiciones integrales. Las mesas de trabajo conformadas se muestran a continuación:

Tabla 4.

Asistentes al Taller participativo para la ubicación de las Posibles Áreas para el Desarrollo de Proyectos de Inyección Geológica de CO2 en el Perú

<p style="text-align: center;"><u>Mesa de trabajo 01</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Ysmael Carrión Huamán (CONCYTEC): Analista de Comunicación Externa. ▪ Orlnado Ccora Tuya (SENAMHI): Especialista en Meteorología. ▪ Graciela del Carmen Fernandez de Córdova Gutierrez (PUCP): Docente investigadora. ▪ Ramiro Luis Piedra Rubio (GEORYS INGENIEROS): Gerente técnico. ▪ Carlos Ahumada (REPSOL): Jefe de Medio Ambiente. 	<p style="text-align: center;"><u>Mesa de trabajo 02</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Luis Eduardo Cornejo Fiestas (MINEM): Especialista de hidrocarburos ▪ Eduard Galvez Mejía (INGEMMET): Practicante profesional. ▪ Gysela Ladera Castañeda (SERNANP-MINAM): Especialista ambiental. ▪ Pedro Raúl Arriola (REPSOL): Geólogo de Exploración.
<p style="text-align: center;"><u>Mesa de trabajo 03</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Erick García Gonzales (ANA): Profesional. ▪ Rolando Rodolfo Cruzado de la Riva (FONDECYT): Supervisor técnico de la Unidad de Seguimiento y Monitoreo. ▪ Edwin Centeno Tupiño (ANA): Hidrogeólogo – Geofísico 	<p style="text-align: center;"><u>Mesa de trabajo 04</u></p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Victor Gabriel Carlotto Cano (PUCP): Estudiante de pregrado de Ingeniería Civil. ▪ Wilfredo Quispe Quispe (ANA): Profesional ▪ Edita Caceli Talledo Flores (SENAMHI): Subdirección de

<ul style="list-style-type: none"> ▪ Carlos Luna Amesquita (IGN): Jefe de Nombres Geográficos. ▪ André Mauricio Valderrama Espinoza (PUCP): Estudiante de Ingeniería Civil. 	<p style="text-align: center;">Modelamiento Numérico de la Atmósfera.</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Eduardo Franco Sanchez Ponce (PUCP): Graduado de Ingeniería Civil.
---	--

Cada integrante de las mesas conformadas dio su opinión a partir de su punto de vista técnico y de su experiencia profesional, sobre las consideraciones que deberían abordarse en un proyecto de inyección geológica. A cada grupo se le asignó los 4 mapas elaborados con consideraciones preliminares agrupadas en 4 dimensiones: dimensión geológica (fallas geológicas, lotes petroleros y lotes en convenio de evaluación técnica), dimensión social (restos arqueológicos y centros poblados), dimensión económica y de la infraestructura existente (red vial nacional y departamental, líneas férreas, línea del gasoducto, línea del oleoducto, puertos y muelles) y dimensión ambiental (ríos principales, lagos, lagunas, área nacional – regional y privada protegida). En cada mesa de trabajo, como se observa en la figura 13 se superpuso las diferentes dimensiones involucradas y sus respectivas variables. A continuación, se estableció el debate y las conclusiones, a las que se llegaron. Estas se plasmaron gráficamente en un mapa del Perú. Paralelamente, se desarrolló el método DELPHI: cada experto del taller llenó un cuadro de valoración de cada variable discutida en torno al desarrollo del proyecto. Finalmente, se estableció una sesión plenaria, en la cual cada grupo expuso las ideas que había concluido, entre ellas apreciaciones sobre las variables preliminares, congruencia entre cada una de las dimensiones expuestas en el proyecto y sobre qué aspectos adicionales deberían discutirse para el correcto desarrollo del proyecto. La información y opiniones aportadas por los expertos fueron relevantes en cuanto a la visión que se tenía del proyecto.



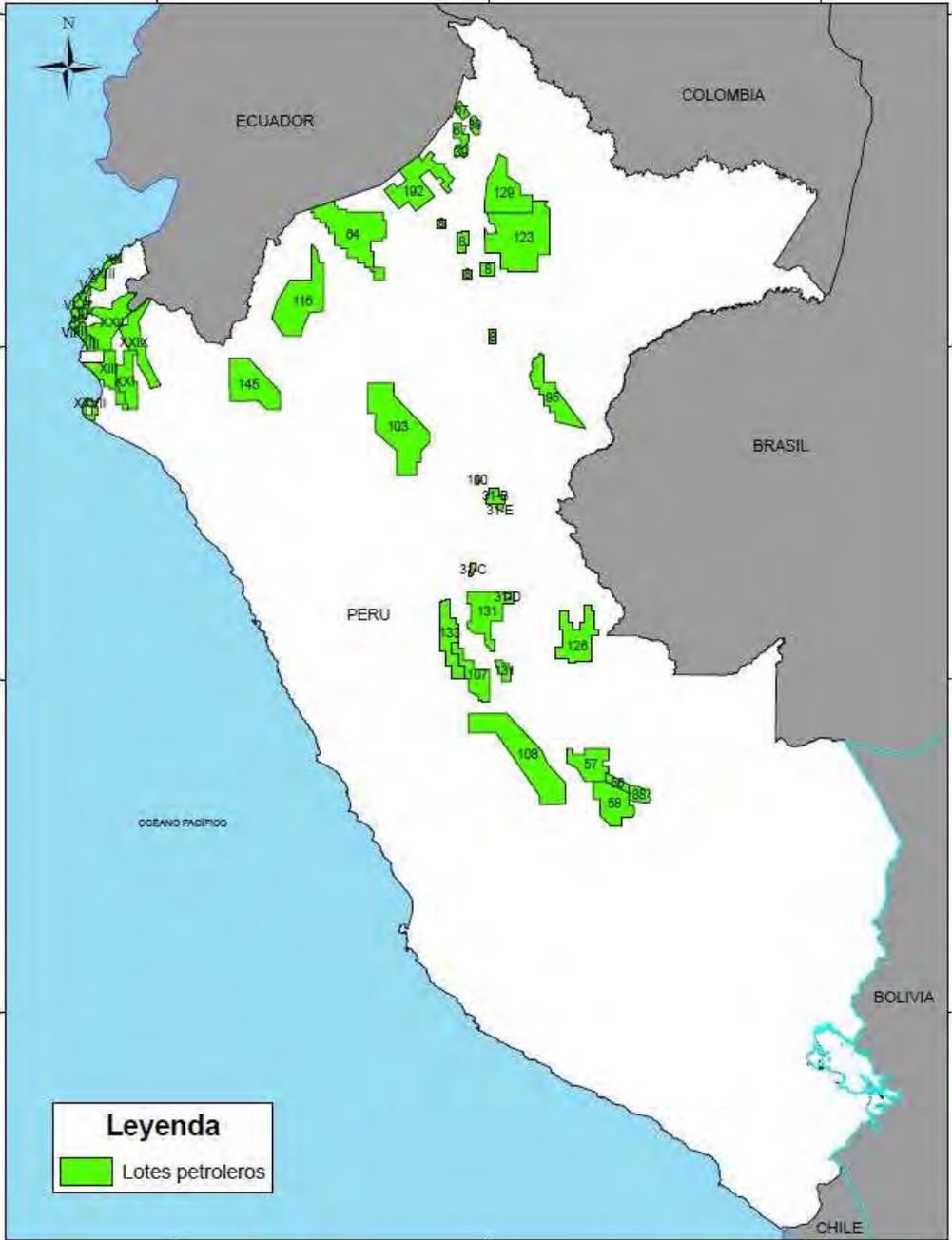
Figura 13. Mesas de trabajo establecidas, para la revisión de los mapas elaborados en función de 4 dimensiones.

4.4 Criterios de eliminación: descarte de variables desfavorables para la inyección de CO₂ en el Perú.

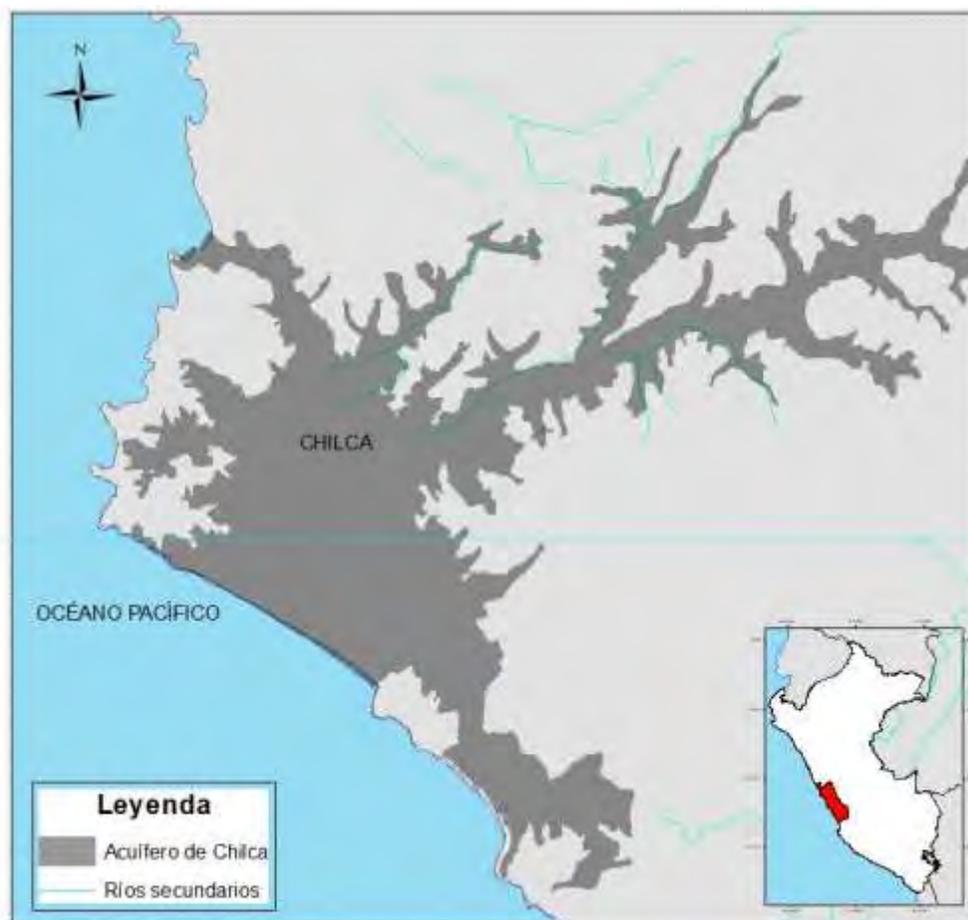
Depósitos posibles para la inyección geológica de CO₂ en el Perú

Los sitios favorables para la inyección geológica de CO₂ son comúnmente acuíferos salinos ubicados a una gran profundidad; depósitos agotados o relativamente agotados de petróleo (a través de la recuperación secundaria o *EOR*); betas de carbono (Mariño-martínez & Moreno-reyes, 2018). Si bien, el alcance del proyecto involucra la ubicación de locaciones propicias dentro del territorio peruano, estas se estudiarán dentro de la superficie continental, mas no en emplazamientos ubicados mar adentro, *offshore*. En ese sentido, en función de la validación de información realizada en el taller participativo, se pudo determinar que las locaciones posibles e ideales para realizar la inyección geológica de CO₂, dentro del Perú,

son aquellas referidas a los depósitos o lotes petroleros, actualmente en explotación, y a los acuíferos salinos. (Taller Participativo, 2018) Así, en la figura 14 (a) y en la figura 14 (b), se muestran los posibles sectores dónde podría realizarse la inyección geológica de CO₂: lotes de petróleo (Perú Petro, 2017) y acuífero contaminado por intromisión marina en Chilca (ANA, 2016). La existencia de información fue determinante en la elección de ambas locaciones.



(a) Lotes petroleros dentro del territorio continental peruano (Perú Petro, 2017)



(b) Acuífero salino, (ANA, 2017)

Figura 14: Mapas de los posibles depósitos en Perú, para el almacenamiento geológico de CO₂. Fuente: (ANA, Perú Petro)

La figura 14 (a) enseña un panorama general de los lotes petroleros ubicados en la superficie continental del Perú, donde se podría realizar la inyección geológica de CO₂ en alguno de los pozos de extracción agotados o en explotación, mediante la recuperación secundaria. Por otro lado, la figura 14 (b) muestra el acuífero de Chilca, ubicado en Cañete que, lamentablemente, dado que los estudios conocidos existentes respecto al acuífero se realizaron hasta profundidades de aproximadamente 500 metros, valor que no es ideal para la inyección geológica de CO₂, ha sido descartado como sitio potencial de inyección.

Depósitos, criterios de eliminación y sitios potenciales

Es posible determinar criterios de eliminación o “*killer criteria*” que permitan definir las pautas o principios para poder descartar un determinado conjunto de opciones. En

consecuencia, estos criterios permiten delimitar las áreas potenciales para el almacenamiento o inyección geológica de CO₂ (Grataloup et al., 2009).

En el caso del proyecto de investigación, los criterios de eliminación seleccionados (aplicados al contexto geológico y geográfico del país) son como se indica a continuación:

- **Fallas geológicas:** la presencia de fallas mayores, ya que afectan a la sucesión sedimentaria por completo (Grataloup et al., 2009)
- **Áreas protegidas:** Dichas regiones están consideradas como un *killer criteria* (Grataloup et al., 2009), ya que comprenden regiones intangibles de interés nacional.
- **Actividad sísmica:** debido a la ubicación del Perú en el Cinturón del Fuego del Pacífico, dentro del país existe una actividad sísmica elevada. Los epicentros configuran el registro de dicha actividad. En consecuencia, estos deben ser tomados en consideración, ya que se les podría asociar a eventuales fugas de CO₂.

Ahora bien, las capas de información de los criterios descritos se obtuvieron de fuentes como el IGP, el Sernanp y el Servicio Geológico de los Estados Unidos, (*USGS*). Estas se superpusieron a las capas que delimitaban los depósitos posibles para la inyección geológica, de manera que se obtuvo una visión general de aquellos depósitos que no deberían considerarse en el proyecto. La figura 15 enseña dicha superposición entre capas, a continuación:

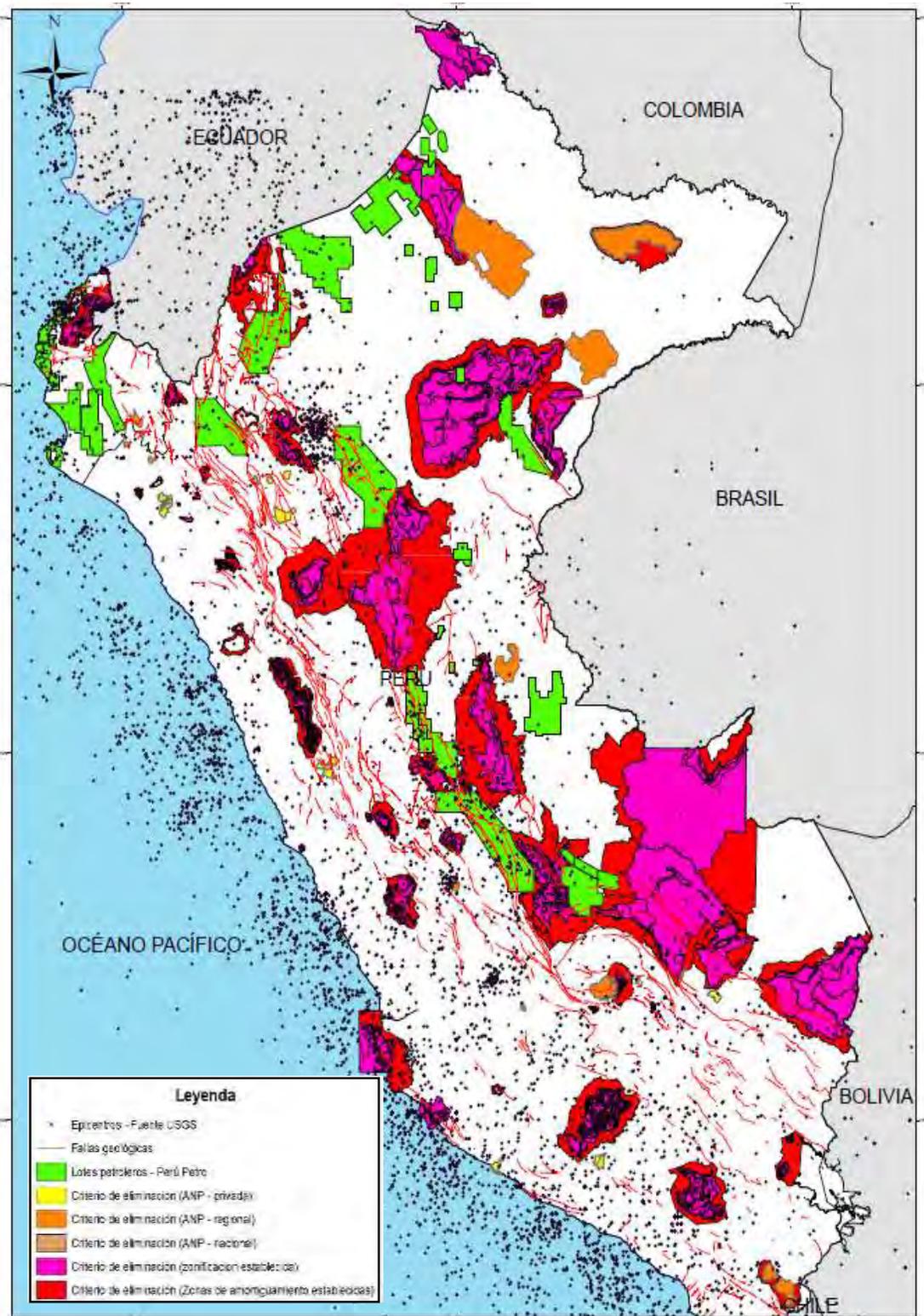


Figura 15. Mapa de depósitos posibles para la inyección geológica de CO₂ y los criterios de eliminación.
Fuente: Sernanp, Perú Petro, USGS 2017.

Como se enseña en la figura 15, la gran mayoría de lotes petroleros contemplados, se encuentran en territorios donde existe presencia de fallas geológicas y de moderada actividad sísmica. También, algunos lotes petroleros se sitúan sobre zonas de amortiguamiento, áreas de zonificación establecida y áreas naturales protegidas (ANP). Dichas regiones componen también criterios de eliminación, ya que, por un lado, las zonas de amortiguamiento se refieren a franjas de vegetación pertenecientes al paisaje que influyen los procesos ecológicos y además proveen una variedad de bienes y servicios hacia la sociedad (Bentrup, 2008). Por otro lado, las áreas naturales protegidas corresponden al patrimonio natural de la nación, que debido a su diversidad biológica y a su importancia cultural, paisajística y científica, cuentan con un marco institucional y normativo cuya función principal es la de su conservación en el tiempo (SERNANP, 1995). Finalmente, los lotes petroleros que se encuentran superpuestos con los criterios de eliminación, arriba mencionados, no serán tomados en cuenta como posibles sitios de inyección. En consecuencia, se, presenta el mapa del Perú dónde se esquematiza las posibles zonas de inyección geológica de CO₂ y aquellos sitios descartados.

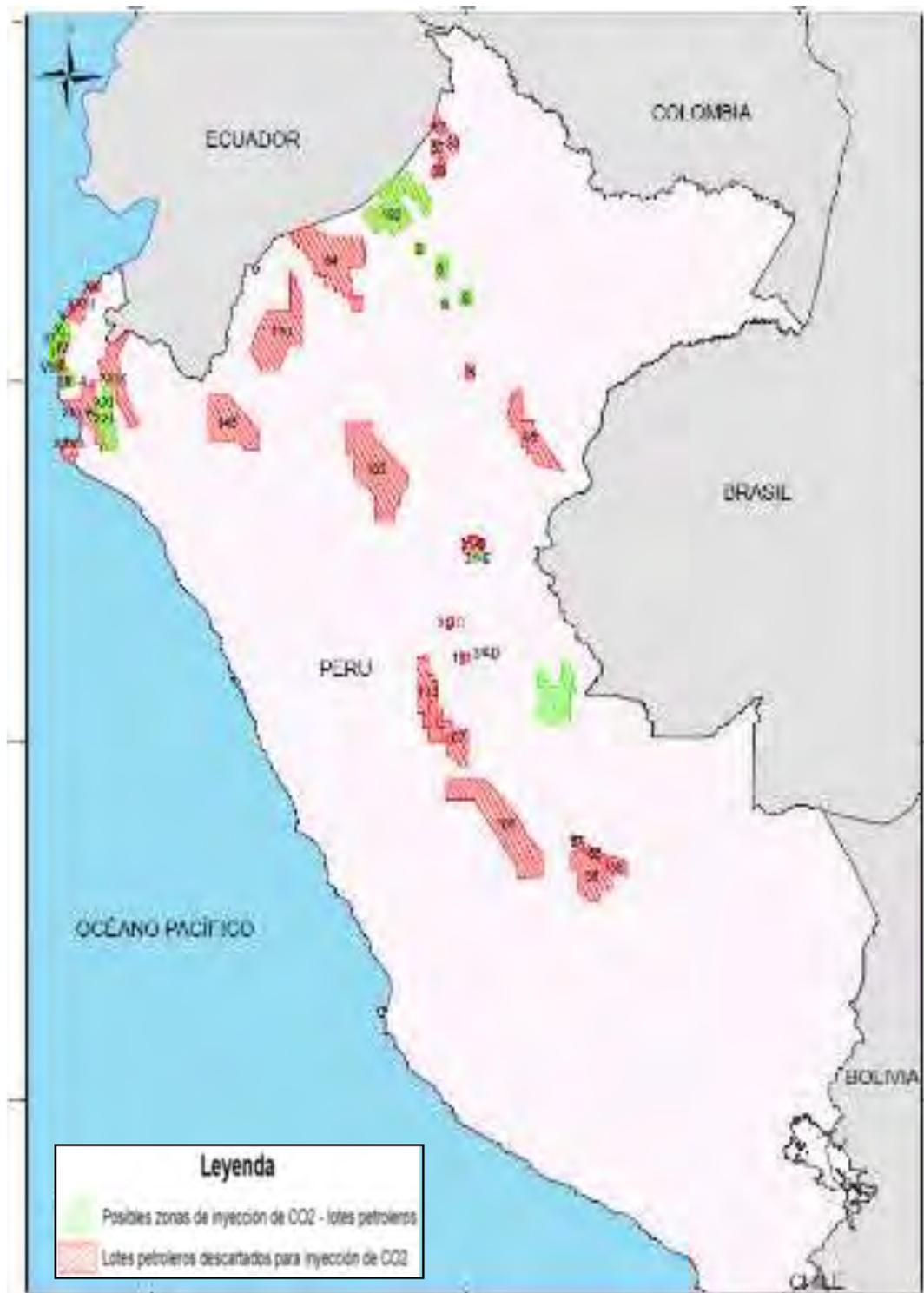


Figura 16. Mapa zonificado con posibles sitios para la inyección y sitios descartados. Lotes petroleros.

Fuente: Perú Petro, 2017.

En la figura 16, las regiones delimitadas en color verde representan aquellas zonas con potenciales sitios para la inyección geológica de CO₂, mientras que aquellas regiones delimitadas en color rojo representan las áreas descartadas para la inyección, a partir de los criterios de eliminación citados anteriormente.

En adelante, el interés del proyecto se concentrará únicamente en aquellas áreas potenciales consideradas preliminarmente. Así, se cuenta con un total de trece sitios de interés: lotes petroleros a lo largo del Perú. Una mejor representación de la distribución de depósitos probables se muestra a continuación:

Tabla 5.

Distribución de sitios posibles de inyección por regiones geográficas

Departamento	Tipo de depósito	Cantidad
Ucayali	Lote petrolero	1
Loreto	Lote petrolero	3
Piura	Lote petrolero	9

4.5 Segundo filtro de información: superposición de dimensiones y criterios relevantes para la inyección CO₂ en el Perú

En el taller participativo realizado, se discutieron las diferentes variables que debería considerarse para la elección de sitio para la inyección geológica de CO₂. Así, cada mesa de trabajo y cada técnico de las diferentes especialidades dio un valor de importancia a todos los parámetros. Se estableció un valor de corte cuya finalidad es la de tomar decisiones de seleccionar o no algún parámetro en particular. En el caso del taller participativo, dicho valor se consideró como 0.51. En consecuencia, cualquier parámetro con valor igual o mayor al mencionado será tomado en consideración, mientras que algún parámetro cuyo valor esté por debajo, será descartado. A continuación, se muestra la tabla con los criterios considerados y con los parámetros que obtuvieron resultados mayores a 0.51:

Tabla 6.

Tabla con acuerdo de los expertos para la evaluación e identificación de zonas potenciales de almacenamiento de CO₂

Criterio	Variable	Parámetro	Valor acordado	
Tectónica y estructura	Propiedades geodinámicas y geotérmicas	Presiones laterales de la cuenca sedimentaria.	0.57	
		Presiones geodinámicas	0.57	
	Fracturas y fallas	Dirección y buzamiento de fracturas y fallas	0.66	
		Velocidad de movimiento relativo	0.53	
Geología	Formación almacén	Porosidad	0.66	
		Permeabilidad	0.7	
		Tipo de litología	0.7	
		Espesor de la formación	0.66	
		Profundidad	0.66	
		Capacidad de almacenamiento	0.66	
	Formación sello	Plasticidad	0.66	
		Porosidad	0.61	
		Permeabilidad	0.7	
		Tipo de litología	0.61	
		Espesor de la formación	0.7	
		Presión estructural	0.66	
	Hidrogeología y fluidos en el medio poroso	Densidad del fluido	0.61	
		Solubilidad de CO ₂	0.66	
	Datos históricos en estructuras existentes	Fugas previas de hidrocarburos en pozos exploratorios	0.7	
		Fugas previas de hidrocarburos en fracturas o fallas	0.7	
		Disponibilidad de datos existentes de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc.	0.7	
	Componente físico	Fuentes de agua	Cercanía a fuentes de agua dulce	0.53
			Cercanía a fuentes de agua subterránea	0.7
		Peligros naturales	Peligro sísmico	0.61
Componente biológico	Biodiversidad	Cercanía a zonas protegidas	0.61	
		Cercanía a ecosistemas frágiles	0.61	
		Cercanía a hábitats de especies endémicas y vulnerables	0.61	
Componente poblacional	Ocupación del territorio	Cercanía a núcleos sensibles poblacionales	0.66	
		Cercanía a poblaciones vulnerables	0.66	
	Conflictos	Por actividad minera ilegal	0.61	
	Uso del suelo	Compatibilidad con usos de suelo a futuro	0.53	
Compatibilidad con usos de suelo actuales		0.57		

Facilidades logísticas	Accesibilidad	Vías (autopistas, carreteras, trochas)	0.61
		Aeropuertos	0.53
		Puertos	0.57
	Servicios de comunicación	Telefonía	0.61
		Internet	0.53
		Radio	0.57
Condiciones de salubridad	Propagación	Clima	0.57
Condiciones técnicas	Locación	Topografía	0.61
		Área disponible	0.66
		Existencia servicios básicos	0.53
		Infraestructura existente y posiblemente afectada	0.7

La tabla 6 representa la percepción global de todos los panelistas presentes en el taller participativo. Según esta, existe una mayor valoración a los parámetros geológicos o técnicos que abarcaría un proyecto de almacenamiento geológico. Asimismo, los factores de riesgo como la cercanía a poblaciones o a áreas protegidas comprendieron valores elevados en la ponderación. De forma práctica, para la evaluación general de criterios de los 13 sitios potenciales, de la tabla 6 se seleccionaron los criterios más importantes, cuyos valores acordados superaban el término de 0.6. Estos, más los criterios descritos por Llamas y Cienfuegos en la tabla 2 y tabla 3 derivan en un registro global de criterios que se adaptan al contexto peruano, de los sitios considerados para el almacenamiento de CO₂. Este nuevo registro se observa en la tabla 7.

Con el fin de contar con valoraciones numéricas para los parámetros adicionales, basados en el contexto nacional, se les analizará y asignará números impares a sus descripciones en la escala del 1 al 9, como lo consideran los autores Llamas y Cienfuegos. El parámetro “peligro sísmico” considerado será analizado en función del mapa de zonas sísmicas que considera diferentes aceleraciones de suelo. Así, como se observa en la figura 17, de la norma técnica de edificaciones, a la zona Z4 le correspondería un valor de 9, a Z3, un valor de 7, a Z2, un valor de 3 y a Z1 un valor de 1. Como se aprecia en la descripción, este parámetro es de naturaleza desfavorable para la elección de sitio potencial.



Figura 17. Mapa sísmico de las aceleraciones de suelo en el Perú. Fuente: NTE 0.30 Diseño sismo resistente, 2018.

El parámetro de distancia a fuente emisora considerado por los autores Llamas y Cienfuegos (tabla 2), implica todo el trabajo e inversión a que debe realizarse para transportar el CO₂ en estado supercrítico hacia el sitio de inyección. En el contexto nacional, este será considerado como la infraestructura existente que puede ser utilizada para el transporte del CO₂: infraestructura vial, gasoducto actual, accesibilidad a los sitios de inyección, entre otros. Estos elementos están representados en la figura 18. Según este último, se establecerá los valores numéricos como 1 para aquellos sitios que tengan una gran accesibilidad, que sea transversal y esté interconectado a otras ciudades; 9 como aquellos sitios que presenten muy

poca o nula accesibilidad desde ciudades cercanas; y 5 a aquellos que cuenten con una accesibilidad intermedia.



Figura 18. Mapa de los lotes petroleros – accesibilidad – Infraestructura vial. Fuente: MTC, Perú Petro, 2017.

El parámetro de existencia de conflictos por actividades extractivas se ha representado en función de la figura 2. Como se observa en dicho gráfico, se establecen niveles de ocurrencia para cada región del país en función del número de conflictos sucedidos en su interior. Así, para regiones que contemplan un número de conflictos de 20 o más se define un nivel alto, cuya valoración será de 9. Regiones con un número de conflictos entre 10 y 19 serán definidas con un nivel intermedio a quienes corresponderá un valor numérico de 5. Finalmente, para regiones que cuenten con un número de conflictos entre 1 y 9 se considerará un nivel bajo, cuya correspondencia numérica será de 1. Para una mejor visualización de las ocurrencias de

conflictos sociales, se presenta la figura 19. Asimismo, en dicho mapa, también se presenta la existencia de restos arqueológicos y de centros poblados.

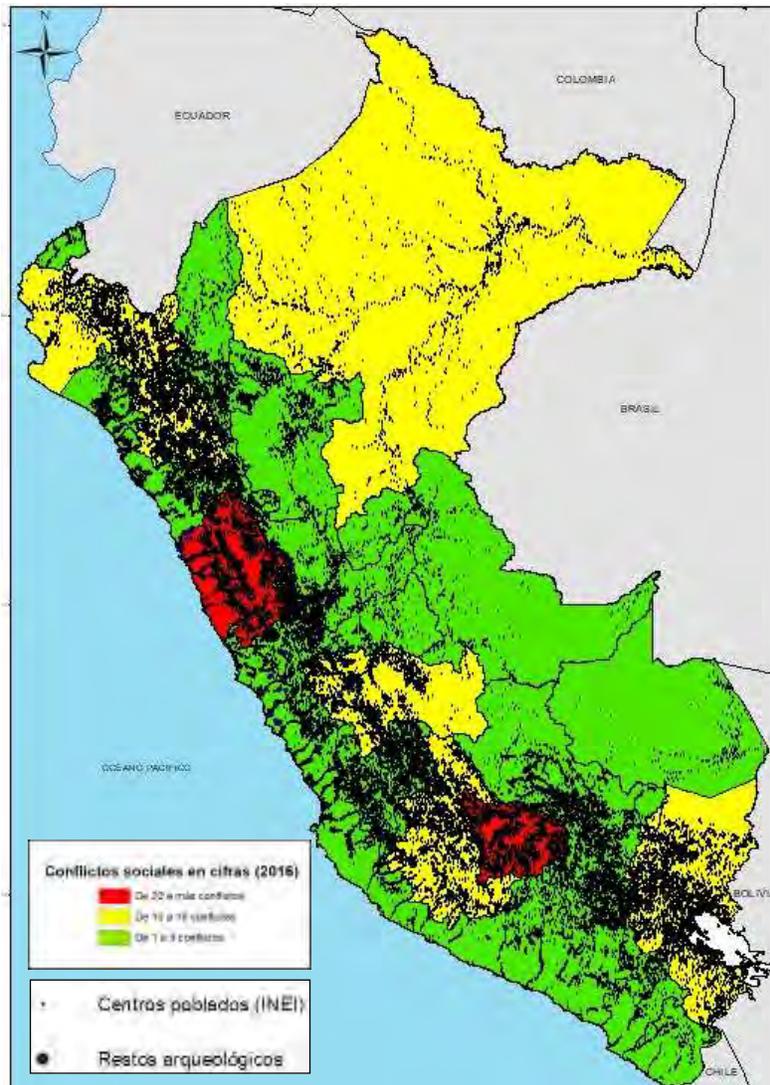


Figura 19. Mapa de conflictos sociales en el Perú, por departamentos. Fuente: Defensoría del Pueblo, 2016.

Asimismo, algunos parámetros considerados en la tabla 2 y tabla 3 fueron reinterpretados, en respuesta a la información con la que se cuenta. Por ejemplo, ya que los lotes son regiones de estudio muy amplias, no se utilizó el parámetro de la distancia de sitio, en contemplación, hacia la población más cercana, sino se reformuló dicho parámetro como la cantidad de poblaciones, centros poblados, áreas urbanas, etc. dentro del lote en cuestión. Así, como se observa en la figura 20, un número de poblaciones mayor a 100 dentro del área de estudio tendrá una valoración de 1; 20 poblaciones corresponden al valor numérico de 3; 10 tendrán

una valoración de 5; 5 poblaciones corresponden al valor de 7 y, finalmente, ninguna o muy pocas poblaciones serán calificadas con el valor de 9.

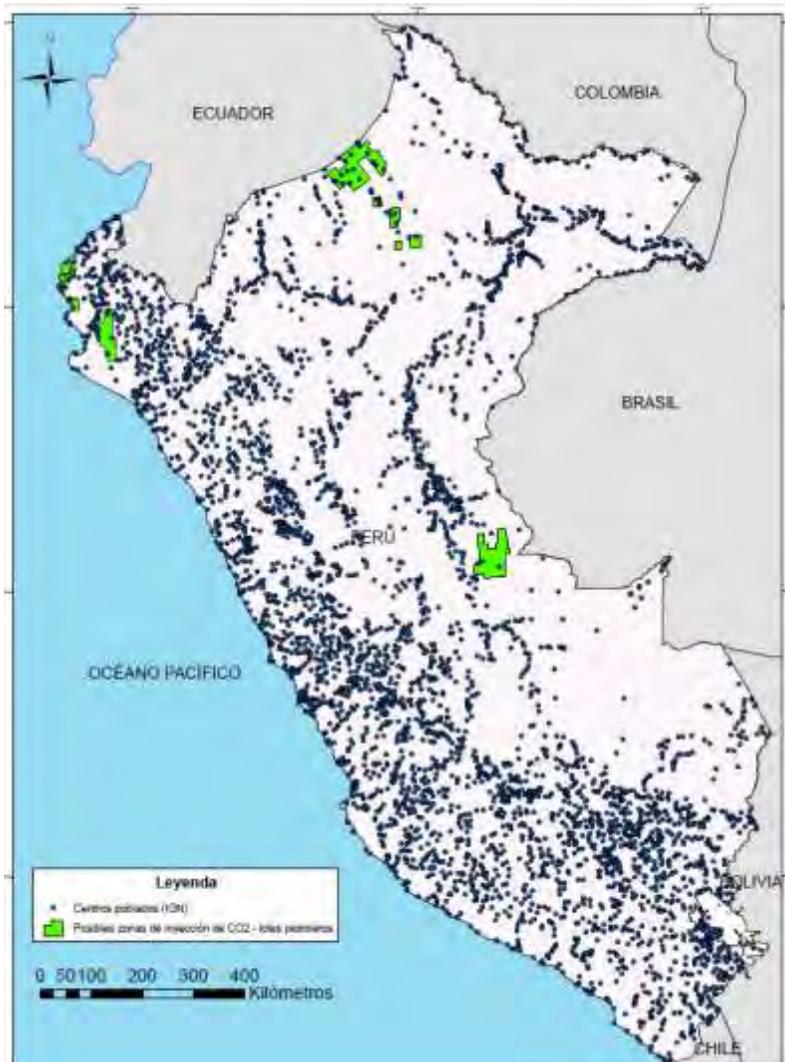


Figura 20: Mapa de lotes en consideración y centros poblados, a nivel nacional. Fuente: INEI, Perú Petro, 2017.

De la misma forma, en cuanto al criterio “recursos ambientales” considerado por los autores Llamas y Cienfuegos, en el presente estudio se definió dicho parámetro como la cercanía hacia las zonas protegidas, ecosistemas frágiles, hábitats de especies endémicas y vulnerables. La descripción y valoración de dicho parámetro será similar a las de la tabla 3. Por último, la distancia a los recursos culturales se determinará como la distancia de los lotes en consideración hacia los restos arqueológicos. La valoración numérica de dicho criterio es

también similar a la de la tabla 3. También, a partir de la tabla 2, tabla 3, tabla 6 y de las interpretaciones consideradas hacia algunos parámetros, se estableció la tabla 7. En dicha tabla se encuentran los criterios o parámetros que se describirán, para cada lote considerado, y a quienes, posteriormente, se les otorgará un valor matemático en la escala impar de 1-9. Finalmente, ya que la información obtenida no detalla la capacidad de reservorio en Mt CO₂, se considerará la unidad mmbo (*million barrels of oil*) o mmstb (*million stock tank barrels*). La valorización numérica que se considerará para este nuevo criterio será, en función de los valores obtenidos, de 1 para lotes descubiertos con capacidad estimada cercana a 1 mmstb, de 3 para lotes con reserva estimada de 200 mmstb, de 5 para 335 mmstb, de 7 para 470 mmstb y de 9 para lotes con capacidad estimada cercanos a 600 mmstb. Se considera ese rango de valores, ya que se pretende dar mayor importancia a lotes con mayor producción. Dichos valores se estimaron linealmente tomando en cuenta la mayor y menor capacidad de los lotes estudiados en unidades mmstb.

Tabla 7.

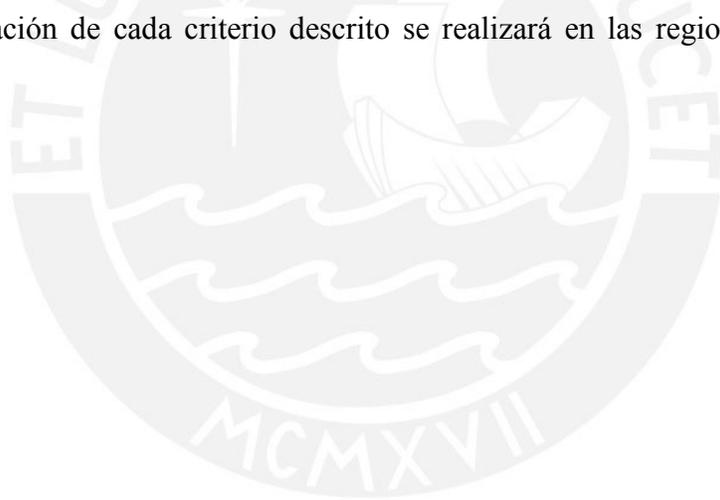
Componentes, variables, parámetros y valoraciones considerados para la presente investigación. Adaptación de Llamas y Cienfuegos (2012)

Nivel		I	II	III	IV	V
Criterio						
Valor matemático		1	3	5	7	9
Tectónica, estructural	Fracturas		Muy fracturado. Muchas fallas		Pobremente fracturado. Pocas fallas	
	Almacenamiento					
Almacenamiento	Porosidad (%)	<10		10-25		>25
	Permeabilidad	< 1 mD		1-100 mD		>1 D
	Espesor		<10	10-100		>100
	Litología		Otros		Carbonatos	Arenizas
Sello	Plasticidad	Frágil		Intermedio		Dúctil
	Espesor	<10		Región activa 10-100	Región estable 10-100	>100
	Porosidad (%)	>10		10-5		<5
Hidro-dinámica	TDS	<3000		3000-10000 >260000		>10000
	Hidro-dinámica	Local < 100 años		Área 100-1000 años		Regional >1000 años
	Profundidad (m)	<600		600-900	>2000	900-2000

	Temperatura		Cuenca caliente	Cuenca templada	Cuenca fría	
	Capacidad (mmstb)	<10	10-50	50-100	100-150	>150
Otras formaciones	Gas o petróleo		No	Sí, pequeño volumen	Sí. Volumen medio	Sí. Gran volumen
	Betas de carbono		No	Sí. Sin presencia de metano	Sí; profundidad > 800m	Sí; profundidad 200-800m
	Masivo salino		No	Domos	Betas	

Nivel		I	II	III	IV	V
Criterio						
Valor matemático		1	3	5	7	9
	Disponibilidad y calidad de datos existentes de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc.	Sin data. No es posible hacer ninguna interpretación geológica	Poca data. Es posible hacer una interpretación basada en regiones adyacentes	Data detallada y suficiente profundidad. Data general o superficial	Data regional digital (GIS)	Data detallada (GIS), basada en data de profundidad (pozos y sísmica)
	Peligro sísmico (ubicación-NTE)	Z1	Z2		Z3	Z4
	Accesibilidad	Gran		Intermedio		Poca
	Población - Cantidad de núcleos poblacionales	>100	20	10	5	0
	Cercanía a zonas protegidas, ecosistemas frágiles hábitats de especies endémicas y vulnerables	0		10-20		>20
	Recursos culturales - Distancia a restos arqueológicos	0		10-20		>20
	Existencia de conflictos por actividades extractivas	Bajo		Intermedio		Alto
Madurez	Clima		Extremo		Cálido	
	Nueva infraestructura		Toda	Poca		Ninguna

A partir de la tabla 7, se evaluará cada uno de los 13 sitios seleccionados previamente. Para los resultados obtenidos en cada criterio se le asociará un número: 1, 3, 5, 7 o 9 (Llamas & Cienfuegos, 2012). La finalidad de la asignación de esta cifra a cada resultado es la de entregar valores para la posterior utilización del método TOPSIS, que identificará al sitio que comprenda el mejor escenario para el almacenamiento geológico de CO₂. Cabe recalcar que algunos parámetros considerados son de naturaleza desfavorable: deben tener consideraciones adicionales. Como se mencionó previamente, en la tabla 5, la distribución de sitios potenciales comprende a la región de Piura con 9 depósitos considerados, a la de Loreto con 3 depósitos y a la de Ucayali con 1 depósito. Cada región descrita se encuentra en una diferente cuenca sedimentaria. La información geológica que presenta una gran relevancia en la investigación es caracterizada de manera diferenciada en cada cuenca, por lo que, la evaluación de cada criterio descrito se realizará en las regiones sedimentarias abarcadas.



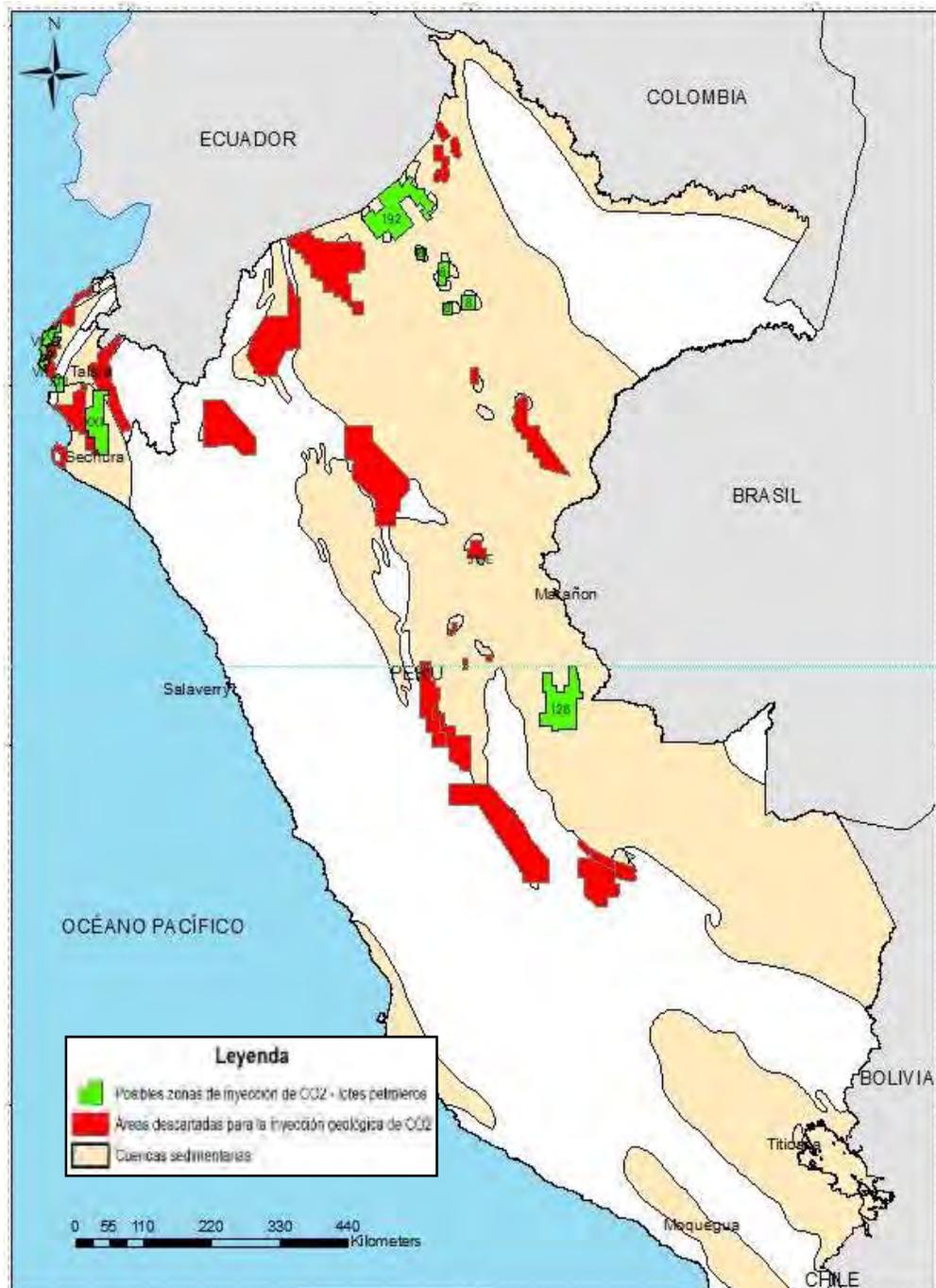


Figura 21. Mapa de sitios potenciales sobre las diferentes cuencas sedimentarias. Fuente: Perú Petro, Sernanp, 2017.

Como se muestra en la figura 21, en la región de Piura, los 8 depósitos o lotes se encuentran sobre las cuencas adyacentes de Talara y Sechura. Por otro lado, en la región de Loreto, los 3 lotes se ubican sobre la cuenca del Marañón. Asimismo, en la región Ucayali, el lote

descrito se sitúa sobre la cuenca de Ucayali. En ese sentido se prosiguió a trabajar los diferentes parámetros para cada cuenca sedimentaria descrita.

4.5.1 Cuenca Talara

Sobre la cuenca de Talara se encuentran inmersos los lotes I, II, VI, VII, IX, X y XV, como se muestra en la figura 22:

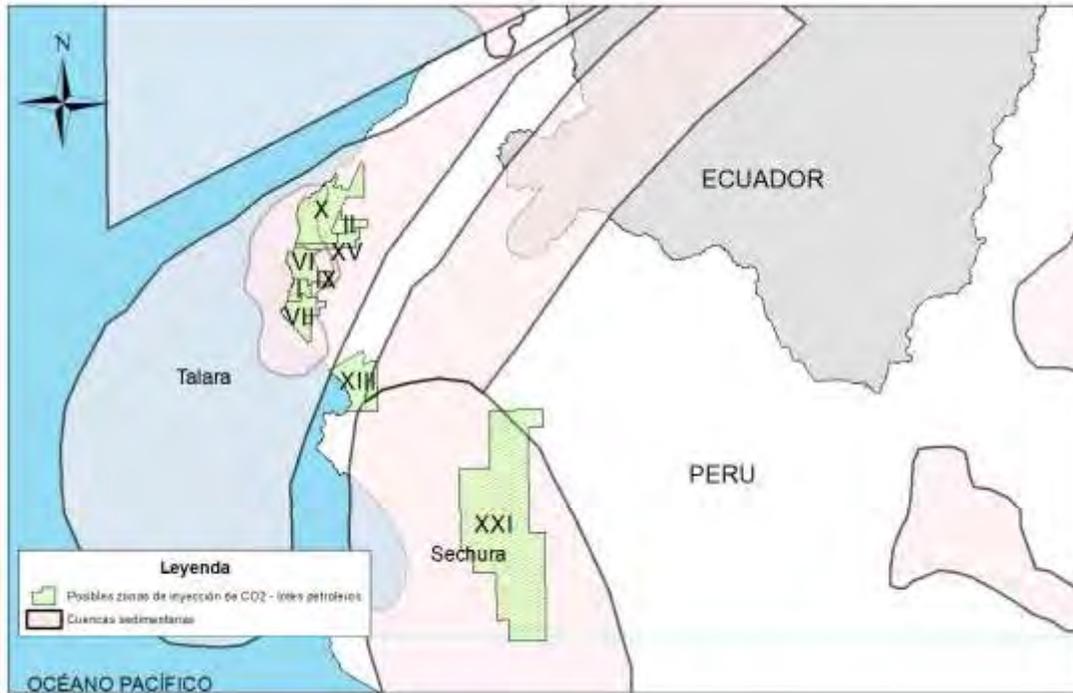


Figura 22. Mapa de cuencas sedimentarias en el noroeste peruano con recomendación de posibles zonas de almacenamiento CO2. Fuente: Peru Petro, 2017.

Teniendo en cuenta que una cuenca sedimentaria es una zona deprimida en la corteza terrestre de un origen tectónico determinado, en la cual los sedimentos se acumulan (Wine & Leader, 2002) algunos parámetros geológicos de las cuencas sedimentarias serán similares para los lotes considerados. Por otro lado, ciertos parámetros serán propios para cada lote considerado, pudiendo ser similares al pertenecer a lotes en la misma cuenca hidrográfica. Aquellos parámetros referidos son la porosidad, permeabilidad, espesor, profundidad, volumen de producción de los reservorios, entre otros. Estos se obtuvieron de la información brindada formalmente por Perú Petro. La información de cada parámetro normalmente se refiere a un pozo o a un conjunto de pozos estudiados. En consecuencia, los valores

encontrados de los factores deseados estarán representados, por lo general, por valores promedios y/o rangos de los mismos.

De esta manera, al referirse al parámetro de fracturas y fallas consideradas para la cuenca hidrográfica de Talara, se considera una gran presencia de estas como se observa en la figura 23:

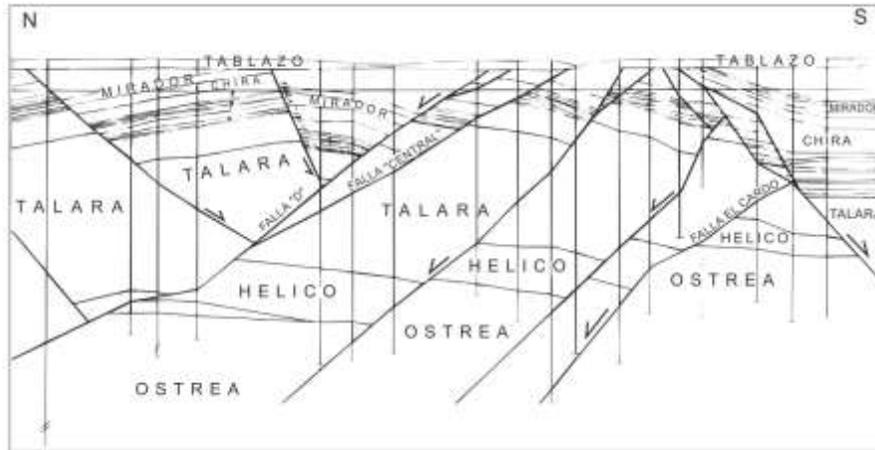


Figura 23. Sección transversal norte – sur de la cuenca de Talara. Fuente: (Higley, 2004) - USGS

- Se observan los desplazamientos laterales y verticales de las formaciones que resultaron del movimiento de las fallas. En consecuencia, tomando como referencia los valores numéricos considerados de la tabla 7, a este parámetro se le otorgará el valor de 3 (Llamas & Cienfuegos, 2012). Este mismo valor será asumido para los demás lotes de la cuenca de Talara, dada su naturaleza geológica fracturada.

Los reservorios tomados en consideración para el almacenamiento geológico de CO₂, en la cuenca de Talara, serán Pariñas y Mogollón, dependiendo del yacimiento al que se refiera, ya que ambas representan formaciones productoras de petróleo en gran volumen, *Figura 24*, y en consecuencia, debido a que el secuestro geológico de CO₂ comprende reservorios de petróleo en explotación o agotados.

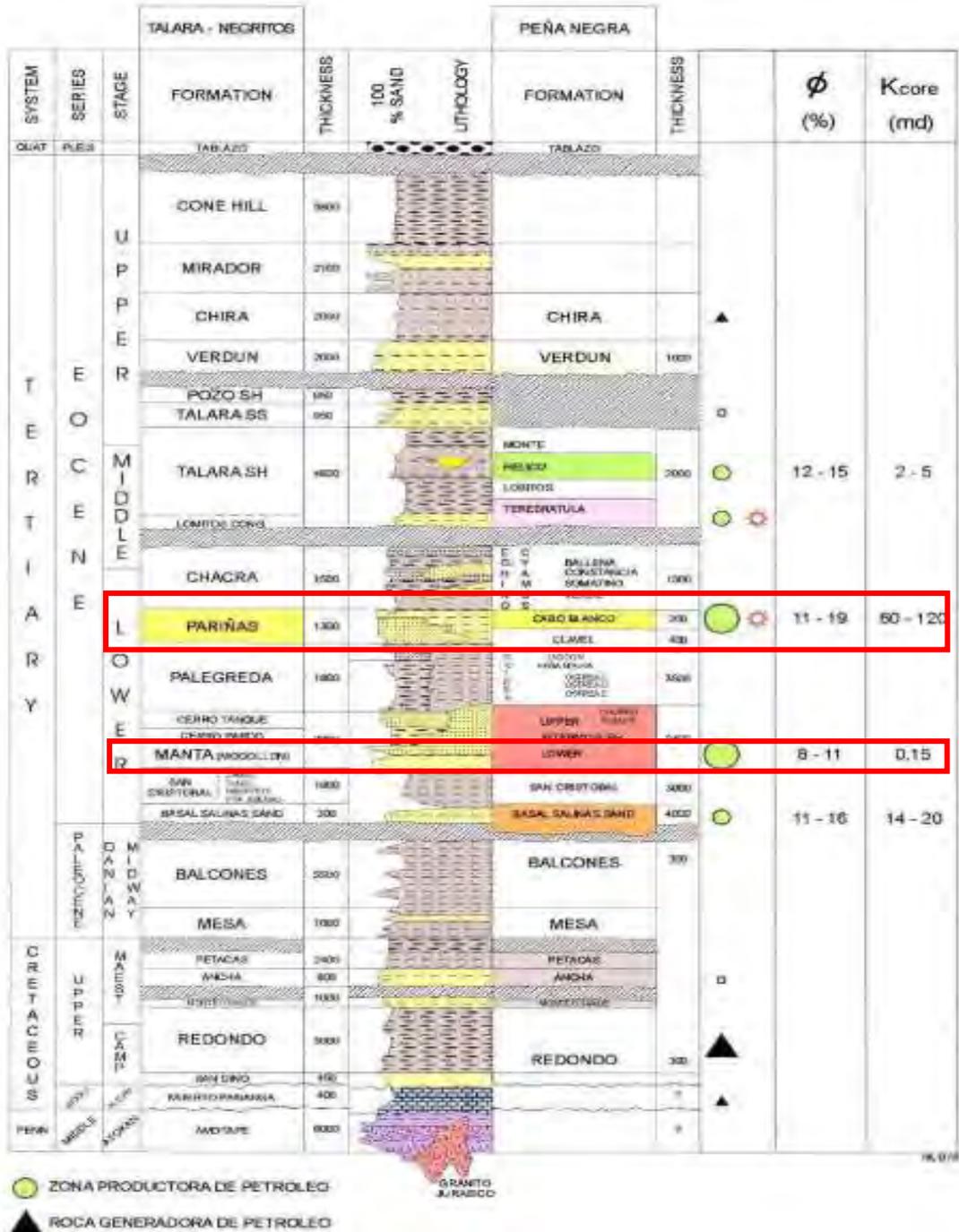


Figura 24. Columna estratigráfica de la Cuenca Talara. Fuente: (Bianchi, 2002) – INGEPET

En ese sentido, el valor de porosidad de la formación de reservorio, variará en cada lote, ya que, en la cuenca de Talara, algunos lotes presentan diferentes reservorios. En consecuencia, también variará la valoración de Llamas & Cienfuegos en cada lote. Dichos resultados para

lote se observan a continuación en la tabla 8, con sus respectivas referencias del banco de datos proporcionado por Perú Petro:

Tabla 8.
Valores de porosidad y valoración numérica de lotes en cuenca de Talara

Lote	Porosidad	Fuente (*)	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
X	4.5% (mogollón)	ITP25208 p38	1
II	8.5% (mogollón)	IT04657	1
XV	15.6% (talara, mogollón, verdún), 4-7% (mogollón)	ITP 20373, p37 - ITP 20373, p28	5
VI	10-13%, 5-8%, 10.6%	ITP20391 p2 (Pariñas) , ITP25479 p4 (Mogollón), ITP20390 p2 (Mogollón)	5
IX	11%	ITP23158 p26	5
I	14.7% - 19.3%	ITP20727 p19, 36	5
VII	10-13%, 5-8%, 10.6%	ITP20391 p2 (Pariñas) , ITP25479 4 (Mogollón), ITP20390 2 (Mogollón)	5

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

Por otro lado, también los valores de permeabilidad de reservorio variarán en cada lote, dependiendo del pozo y estrato que se considere. Se observa los resultados de este parámetro y su respectiva valoración:

Tabla 9:**Valores de permeabilidad de reservorio y valoraciones de lotes en cuenca de Talara**

Lote	Permeabilidad	Fuente (*)	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
X	5-13mD (Mogollón, valor más probable)	ITP25208 p38	5
II	0.11 (Mogollón)	IT04657	1
XV	0.5-10mD (Mogollón)	ITP 20373, p37	5
VI	0.1-1, 0.1-1, 0.1 mD	ITP20391 p2 (Pariñas) , ITP25479 p4 (Mogollón), ITP20390 p2 (Mogollón)	1
IX	6 mD	ITP23158 p26	5
I	15 mD	ITP20727 p36	5
VII	0.1-1, 0.1-1, 0.1 mD	ITP20391 p2 (Pariñas) , ITP25479 p4 (Mogollón), ITP20390 p2 (Mogollón)	1

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

- Según la columna estratigráfica y litológica de la cuenca de Talara, la litología correspondiente a Pariñas y Clavel es arenisca gris claro de grano grueso. Esta descripción, según la tabla 7, tiene una valoración de 9, dado que las areniscas comprenden el mejor escenario para el secuestro geológico de CO₂. De la misma forma, en el caso de los reservorios de Mogollón y Verdún, la litología se describe como conglomerados con matriz de arenas y areniscas, y, areniscas blancas, cuarzosas de grano medio a grueso, parte basal conglomerados, respectivamente. Dichas descripciones tienen similarmente una valoración de 9 según la tabla 7..

Debido a la compleja naturaleza de la formación Pariñas, Mogollón y Verdún a lo largo de la cuenca de Talara, los valores de profundidades y de espesor variarán en cada lote considerado. Así, por un lado, los espesores de Clavel (Pariñas) en los campos de Lobitos y Providencia son, de manera general, de 180 y 305 metros respectivamente (Higley, 2004). Es debido a su rango de variación que debe considerarse el espesor de reservorio en cada lote. Estos resultados y sus valoraciones se dedujeron de los reportes entregados por Perú Petro. A continuación se presenta un registro con los datos mencionados, en la tabla 10:

Tabla 10:

Valores de espesor de reservorio en Cuenca de Talara

Lote	Espesor	Fuente (*)	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
X	305 m (Mogollón)	ITP04696 p8	9
II	785m (Mogollón)	ITO4657 p4	9

XV	24-60m	ITP 20373 p58	5
VI	30-445m	ITP25479 p5	7
IX	448 m	ITP23158 p12	9
I	244m	IPP26721 p18	9
VII	30-445m	ITP25479 p5	7

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

Por otro lado, las profundidades de tope de los reservorios varían también en cada lote de la cuenca de Talara. Determinados valores incluso tienen profundidades que tienen la mínima valoración, como se observa en la tabla 11.

Tabla 11:

Espesores y sus valoraciones en los lotes, la Cuenca Talara

Lote	Profundidad de tope	Fuente (*)	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
X	1780 m (Mogollón)	ITP25208 p33	9
II	1190-1700m	ITO4657 p12	9
XV	1830-2380m	ITP 20373, p36	7
VI	670-1340m	ITP25479 p5	7
IX	300 - 592 m	ITP20488 p12-13	1
I	610-914m	IPP20727 p81	7
VII	670-1340m	ITP25479 p5	7

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

- Los parámetros de sello que deben considerarse son la porosidad, plasticidad y el espesor de formación. La formación elegida para dicho fin es la de Chacra, cuya litología corresponde a una lutita gris micácea (Bianchi, 2002). La permeabilidad de formaciones arcillosas es poco medida y entendida. La data actual sugiere una relación regular entre la porosidad y permeabilidad de lutitas y arcillas. Para ciertos valores de permeabilidad, se obtuvieron porosidades de valores entre 0.1 y 0.4 en estudios regionales y de laboratorio (Neuzil, 1994). Según la tabla 7, el valor numérico asignado es 9.
- Asimismo, la lutita es una roca sedimentaria que se compone de partículas de arcilla y limo: para la definición del valor de la plasticidad de sello, este se asumirá como aquel de la arcilla. Así, debido a la morfología laminar, a la capacidad que tiene de hincharse y a los tamaños de partícula presentes, la arcilla presenta una elevada plasticidad: es decir un comportamiento dúctil. Según la tabla 7, el valor numérico correspondería a 9.

- En cuanto al espesor de dicha formación, el valor es de aproximadamente 460 metros en Talara, mientras que en Peña Negra es de 400 metros (Bianchi, 2002), que al ser mayores a 100 metros, obtienen un valor de 9 según la tabla 7.
- Ya que Talara y Peña Negra se encuentran en la extensión de estudio que abarca a los lotes se asignará un valor promedio al espesor de la capa sello Chacra para aquellos lotes presentes en la Cuenca de Talara, cuya valoración matemática, según la tabla 7, tiene un valor de 9.

Para valorar la calidad de la información que se tiene a cerca de la cuenca de Talara, se presenta la figura 25:

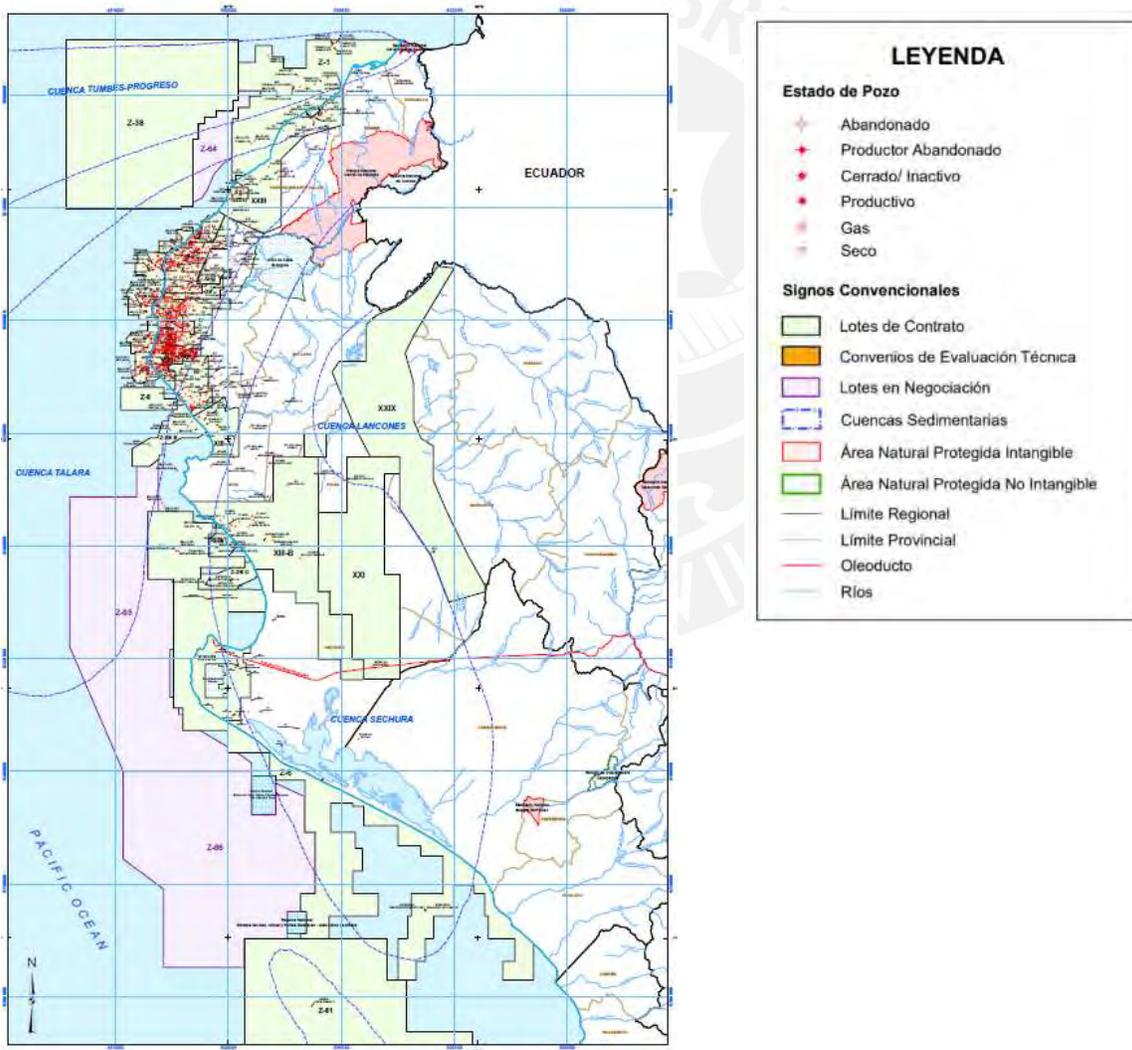
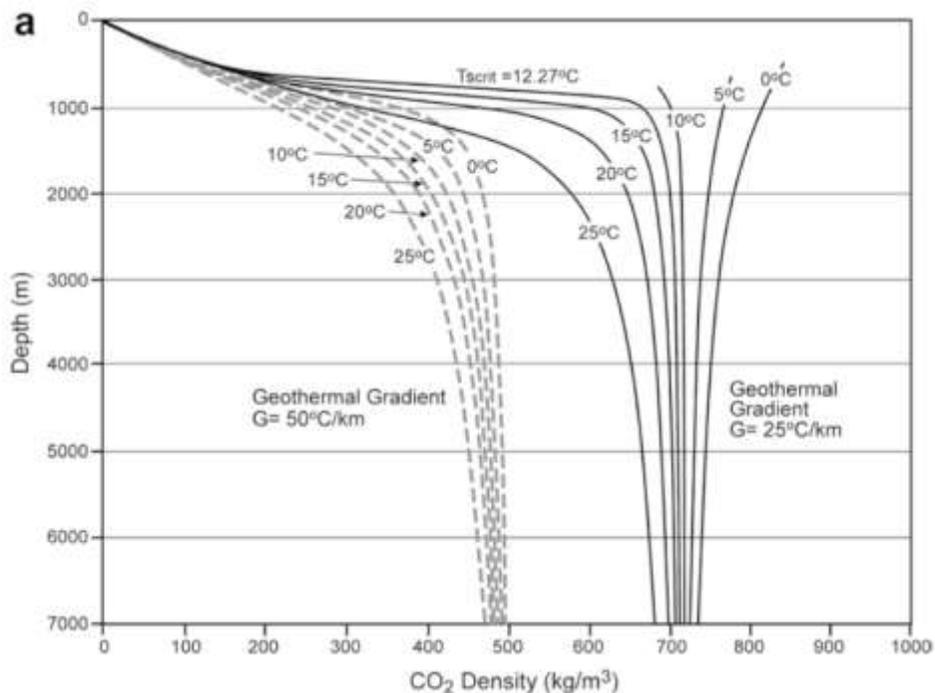


Figura 25. Mapa de lotes de contrato y pozos exploratorios del noroeste del Perú. Fuente: Perú Petro, 2018.

- En la figura 25, se observa una gran densidad de pozos en la cuenca de Talara, precisamente en los lotes que se consideran en la presente investigación. La presencia de los pozos implica estudios de geofísica, geoquímica, entre otros, y, por otro lado, existe una gran cantidad de información pública sobre la cuenca de Talara. En consecuencia, el juicio sobre la calidad de información con la que se cuenta será *información detallada (GIS) basada en data profunda (pozos y sísmica)*, de la tabla 3 (Llamas & Cienfuegos, 2012) cuya valor numérico es 9.

La temperatura de la cuenca es un parámetro importante de la misma forma que el régimen geotérmico: las cuencas “calientes” son menos favorables, para el secuestro geológico de CO₂, que las cuencas “frías”, debido a su relativa reducida capacidad, en términos de la masa del CO₂ y debido también a que a mayor flotabilidad, mejor impulso y mayor migración ascendente del CO₂ (Bachu, 2003). Así, la figura 26 indica la variación de densidad del CO₂ en función de la profundidad, para diferentes gradientes geotérmicos.



- Ya que, en el caso de la cuenca de Talara, el gradiente geotérmico está representado por un valor entre 25 y 50 °C/km, según la figura 26, la cuenca sería templada, cuya valoración numérica está representada por 5, según la tabla 7.
- En cuanto a la capacidad de reservorio, las reservas totales de petróleo en cada lote, son distintas entre sí debido a las características físicas de cada campo perteneciente al lote. Así, los datos tomados en consideración corresponden a los volúmenes de explotación probables de diferentes pozos. Estos y su respectiva valoración se observan en la tabla 12:

Tabla 12

Volúmenes de producción en cada lote de la Cuenca Talara (Perú Petro)

Lote	Capacidad de almacenamiento	Fuente (*)	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
X	100 MMBLS	ITP25208 p42	3
II	220 MMSTB	IT04658	3
XV	185 MMSTB	ITP 20373, p38	3
VI	10.7 MMSTB	Expediente lote VII-VI	1
IX	1.28 MMBLS	ITP23158 p30	1
I	11.53 MMBLS	IPP26721	1
VII	10.7 MMSTB	Expediente lote VII-VI	1

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

- En cuanto al peligro sísmico: como se asignó un valor a cada zona sísmica considerada de la Norma Técnica de Edificaciones E.030, se observa en la figura 17 que los lotes considerados de la cuenta de Talara se encuentran en la zona Z4, a la cual se le asignó un valor de 9.
- Para la medición de las distancias desde los lotes hacia las zonas protegidas consideradas, se presenta la figura 27. Como se observa en dicho gráfico, las distancias desde los lotes hacia la zona protegida más cercana son 10 kilómetros para el lote X, 6 kilómetros para el lote II, 7 kilómetros para el lote XV y mayores a 20 kilómetros para los lotes VI, IX, I y VII. Según la tabla 7, los valores asociados a dichas distancias son 5, 3, 3 y 9 respectivamente.

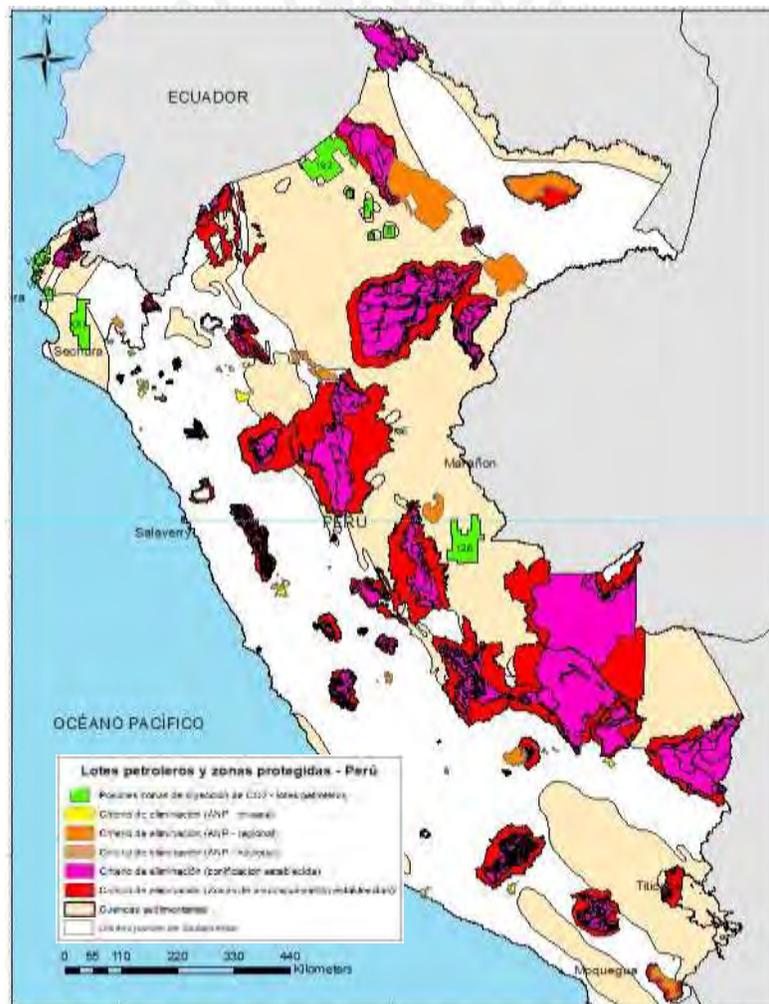
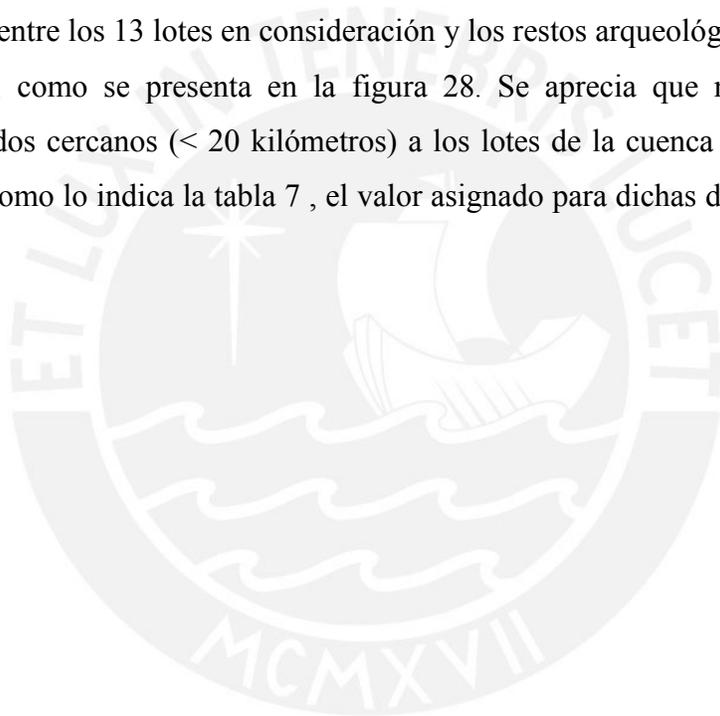


Figura 27: Mapa de lotes petroleros considerados para caso de estudio y zonas protegidas, distribuidas a nivel nacional. Fuente: SERNANP y Perú Petro.

- Sobre la distancia a los núcleos poblacionales, ya que cada lote cuenta con una gran superficie, se relaciona este parámetro con el número de centros poblados, áreas urbanas presentes en dicha región. Así, Como se observa en la figura 20, los lotes con mayor presencia de poblaciones son el lote I y lote X. Aquellos con una densidad media son los lotes VI y VII. Por último, aquellos con poca presencia de centros poblados son los lotes II, IX y XV. En ese orden, como se muestra en la tabla 7, los valores numéricos asociados a dichos grupos son 5, 7 y 9, respectivamente.
- En el caso de distancia a recursos culturales, se consideró como tal a la distancia existente entre los 13 lotes en consideración y los restos arqueológicos más cercanos presentes, como se presenta en la figura 28. Se aprecia que no existen puntos relacionados cercanos (< 20 kilómetros) a los lotes de la cuenca de Talara. En ese sentido, como lo indica la tabla 7 , el valor asignado para dichas descripciones es de 9.



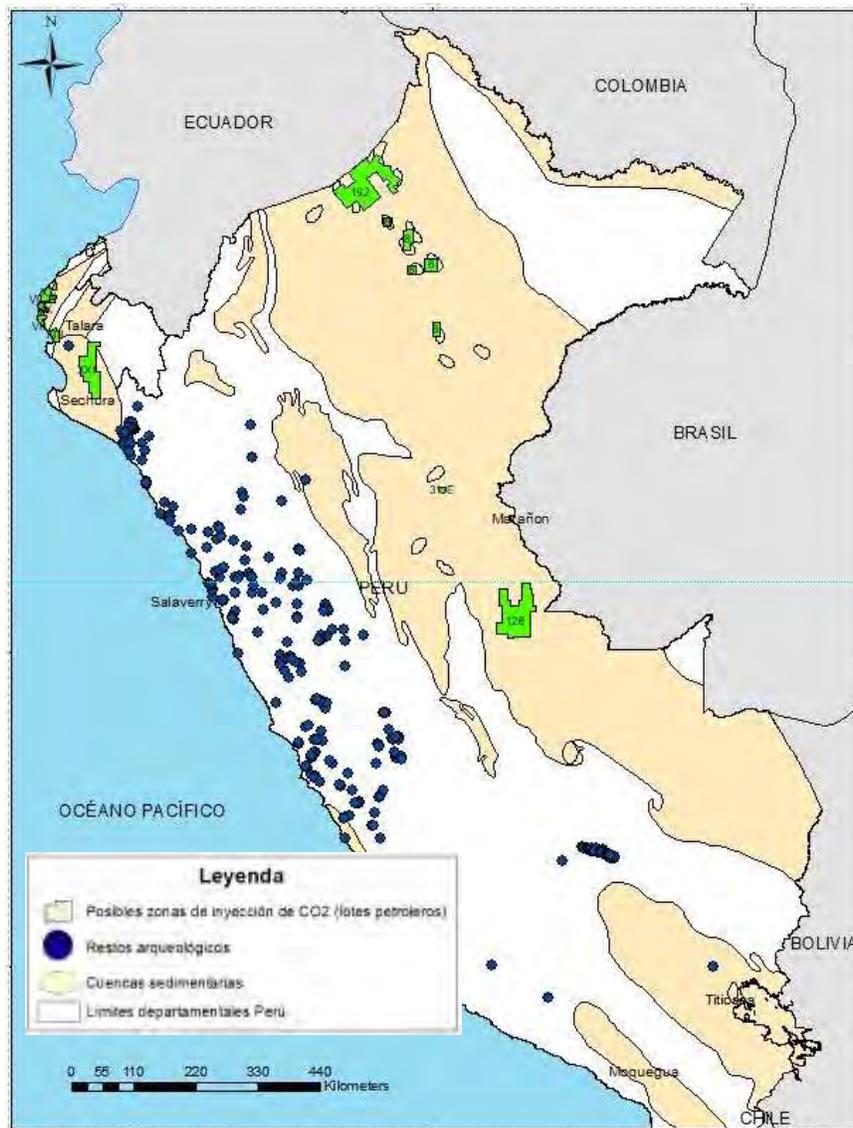


Figura 28: Mapa de lotes petroleros y restos arqueológicos en Perú. Fuente: Perú Petro y Ministerio de Cultura

- Con respecto al parámetro de existencia de conflictos por actividades extractivas, como se mencionó anteriormente, los valores numéricos se asignarán en función del nivel de ocurrencia de conflictos sociales ocurridos. Así, según la figura 19, en Piura se suscitaron entre diez y diecinueve conflictos (Defensoría del pueblo, 2016). Este rango corresponde a un nivel intermedio de ocurrencia y, en consecuencia, un valor numérico de 5.
- El parámetro de distancia hacia las fuentes emisoras de Llamas y Cienfuegos fue adaptado a la realidad nacional como la accesibilidad hacia los sitios de interés. Como

se observa en la figura 18, los lotes presentes en la cuenca de Talara, tienen una gran accesibilidad y posibilidad logística transporte de CO₂. En consecuencia, la valoración numérica correspondiente según la tabla 7, es 1.

- El clima en la región costera de Piura, donde se ubican los lotes de la cuenca de Talara, se puede definir como árido con pocas precipitaciones, de humedad considerable y una temperatura semicálida (18°-19° C) (Senamhi, 2018). En consecuencia, según la tabla 7, se considerará un clima “cálido”, el cual tiene un valoración de 7.
- Con respecto al parámetro de nueva infraestructura, el lote I presenta antecedentes recuperación mejorada de petróleo (EOR), a partir de la inyección de agua en sus campos. Así, puede suponerse que, debido a experiencias pasadas, dicho lote cuenta con condiciones adaptables para la inyección geológica de CO₂, cuya valoración numérica corresponde a 5, (Llamas & Cienfuegos, 2012). Por otro lado, los lotes restantes en la cuenca de Talara, cuentan con diferentes campos de explotación. Debido a la falta de registros de EOR en dichos lotes, puede considerarse que la infraestructura requerida para desarrollar proyectos de CCS es poca o inexistente, que según la tabla 7 la valoración correspondiente es de 3.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores numéricos establecidos para los parámetros de cada lote de la cuenca Talara:

Tabla 13:

Cuadro resumen de la evaluación numérica de los criterios considerados para los lotes petroleros de la cuenca de Talara.

Cuenca Talara		Lote I	Lote II	Lote VI	Lote VII	Lote IX	Lote X	Lote XV
Parámetros	Dirección y buzamiento de fracturas y fallas	3	3	3	3	3	3	3
	Porosidad (reservorio)	5	1	5	5	5	1	5
	Permeabilidad (reservorio)	7	1	1	1	5	5	5
	Tipo de litología (reservorio)	9	9	9	9	9	9	9
	Espesor formación (reservorio)	9	9	7	7	9	9	5

Profundidad (reservorio)	7	9	7	7	1	9	7
Temperatura	5	5	5	5	5	5	5
Capacidad de Almacenamiento (reservorio)	1	3	1	1	1	3	3
Porosidad (sello)	9	9	9	9	9	9	9
Plasticidad (sello)	9	9	9	9	9	9	9
Espesor de formación (sello)	9	9	9	9	9	9	9
Disponibilidad y calidad de datos existentes de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc.	9	9	9	9	9	9	9
Peligro sísmico	9	9	9	9	9	9	9
Cercanía a zonas protegidas, ecosistemas frágiles hábitats de especies endémicas y vulnerables	9	3	9	9	9	5	3
Cantidad de núcleos poblacionales	5	9	7	7	9	5	9
Distancia recurso cultural	9	9	9	9	9	9	9
Existencia de conflictos por actividades extractivas	5	5	5	5	5	5	5
Accesibilidad	1	1	1	1	1	1	1
Clima	7	7	7	7	7	7	7
Nueva infraestructura	5	3	3	3	3	3	3
Presencia de gas o petróleo	7	7	7	7	7	7	7
Masivos salinos	3	3	3	3	3	3	3
Betas de carbono	3	3	3	3	3	3	3

4.5.2 Cuenca Sechura

Sobre la cuenca de Sechura, se encuentran inmersos los lotes XIII y XXI. Se presenta la columna estratigráfica de la cuenca de Trujillo, donde se representan unidades geológicas en la región de Sechura:

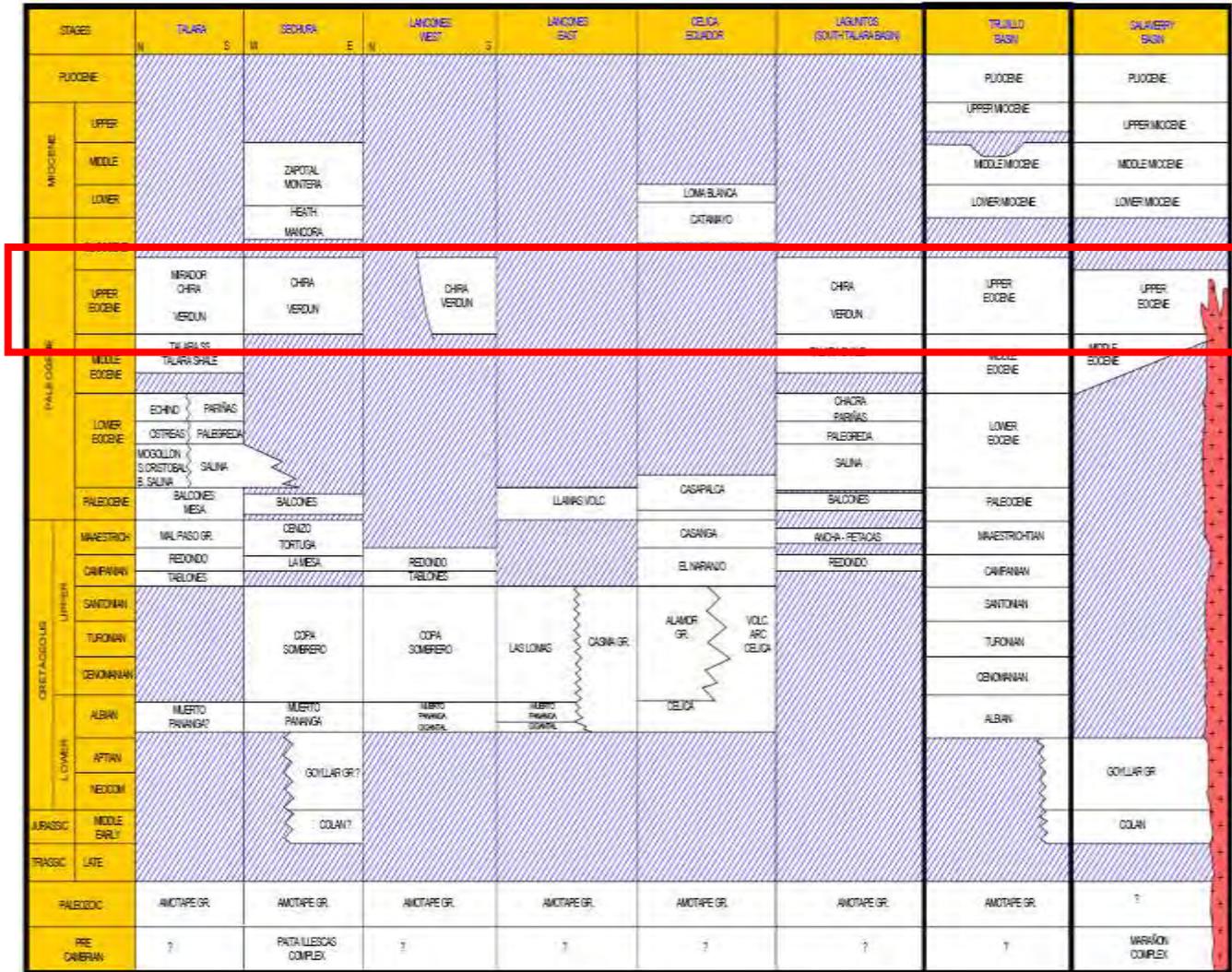


Figura 29: Columna estratigráfica de la Cuenca de Trujillo. Fuente: Wine et al, 2000.

Como se observa en la figura 29, en la región Sechura, las formaciones que se consideraban en la cuenca de Talara tienen una discontinuidad considerable. Esta interrupción se debe a la erosión producida dichas unidades. Si bien, ya que la cuenca de Talara se encuentra adyacente a la de Sechura, podrían ser similares; no obstante, la discontinuidad mencionada representa la inexistencia de la formación Pariñas en esta cuenca. Adicionalmente, la data

recopilada de las bases de datos de Perú Petro no indica la presencia de dicha formación en los lotes presentes en la Cuenca de Sechura. En ese sentido se considerará la formación Verdún como la capa reservorio en los lotes XIII y XXI.

Del mismo modo como en la Cuenca de Talara, la información sobre porosidad, permeabilidad, espesor, profundidad y volumen de capacidad del reservorio dependerá del alcance de los informes con los que se cuenta. Dicha información, su valoración y fuente se presenta en la .

Tabla 14.

Parámetros de los lotes en la Cuenca de Sechura

Lote	XIII	XXI
Porosidad	21%	20% (pozo San Alberto)
Fuente (*)	ITP25238 p26.	ITP25237
Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos	5	5
Permeabilidad	61 mD	"Alta", (reportes de San Pedro)
Fuente (*)	ITP25238 p26.	ITP25237 p9
Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos	5	9
Espesor	65 -145m (Verdún)	130 metros (Verdún)
Fuente (*)	ITP22311, p4	IPP23491, p7
Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos	7	9
Profundidad de tope	1000-1100m (Verdún)	625m Verdún
Fuente (*)	IAP20011 p5	IPP23491, p18
Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos	9	5
Capacidad de almacenamiento	11.85 MMSTB	1.14 MMBLS

Fuente (*)	ITP25238 p2	IPP23491, p50
Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos	1	1

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

- Respecto al parámetro “disponibilidad y calidad de datos existentes”, como se observa en la figura 25, en la cuenca de Sechura, es poca la distribución de pozos petroleros. También la información recibida por parte de Perú Petro no abarca con claridad a lotes mencionados. Esto significaría una poca disponibilidad o acceso a la información. Según la tabla 7, la descripción correspondiente sería de *poca información, posibilidad de realizar interpretaciones en función de cuencas adyacentes* (Llamas & Cienfuegos, 2012), cuya valoración numérica sería 3.
- En cuanto al peligro sísmico, según el mapa de la Norma E.030, figura 17, los lotes en consideración se ubican en la zona Z4, para el cual el valor numérico considerado es de 9.
- Con respecto a la distancia hacia las zonas protegidas, como se observa en la figura 2, ambos lotes se encuentran a más de 20 kilómetros del área protegida más cercana. En consecuencia, según la tabla 7, el valor asociado a dicho parámetro es 9.
- Sobre la cantidad de núcleos poblacionales, como se observa en la figura 20, para el lote XIII se presentan muchos centros poblados, mientras que en el lote XXI se presentan 13 puntos. Según la tabla 7, los valores asociados son 1 y 5, respectivamente.
- La distancia a los restos arqueológicos se representa en la figura 28. Como se observa, hay presencia de un sitio arqueológico dentro del lote XIII, mientras que ninguno cercano al lote XXI. Así, según la tabla 7, los valores numéricos asociados son 1 y 9 respectivamente.
- Como se presentó en la cuenca de Talara, la región Piura cuenta con un nivel intermedio de ocurrencia de conflictos sociales. Así, la valoración numérica para los lotes de la región es también de 5.

- En cuanto al criterio de accesibilidad, como se observa en la figura 18, los lotes presentes en la cuenca de Sechura tienen una gran magnitud, ya que se comprende vías nacionales y departamentales adyacentes a los lotes. En consecuencia, dicho parámetro tiene la misma descripción que en el caso de la cuenca de Talara, cuya valoración numérica corresponde a 1.
- En el caso de los parámetros de clima, dado que los lotes ubicados en la cuenca de Sechura pertenecen también a la región Piura, definida como semicálida, la valoración numérica asociada a dichos lotes será de 7.
- El parámetro “nueva infraestructura” considerado para la cuenca de Sechura, tal como sucede en la de Talara, será de 3, es decir, poca o inexistente. Esto se debe a que no se cuenta con registros de experiencias pasadas sobre EOR en los campos de los lotes considerados en la cuenca presente. Entonces ante una eventual aplicación de secuestro geológico, se requeriría de nueva infraestructura para el desarrollo de la inyección.
- A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores numéricos establecidos para los parámetros de cada lote de la cuenca Sechura:

Tabla 15.

Cuadro resumen de la evaluación numérica de los criterios considerados para los lotes petroleros de la cuenca de Sechura

Cuenca Sechura		Lote XIII	Lote XXI
Parámetros	Dirección y buzamiento de fracturas y fallas	3	3
	Porosidad (reservorio)	5	5
	Permeabilidad (reservorio)	5	9
	Tipo de litología (reservorio)	9	9
	Espesor formación (reservorio)	7	9
	Profundidad (reservorio)	9	5
	Temperatura	5	5
	Capacidad de almacenamiento (reservorio)	1	1
	Porosidad (sello)	9	9

Plasticidad (sello)	9	9
Espesor de formación (sello)	9	9
Disponibilidad y calidad de datos existentes de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc.	3	3
Peligro sísmico	9	9
Cercanía a zonas protegidas, ecosistemas frágiles hábitats de especies endémicas y vulnerables	9	9
Cantidad de núcleos poblacionales	1	5
Distancia recurso cultural	1	9
Existencia de conflictos por actividades extractivas	5	5
Accesibilidad	1	1
Clima	7	7
Nueva infraestructura	3	3
Presencia de gas o petróleo	7	7
Masivos salinos	3	3
Betas de carbono	3	3



4.5.3 Cuenca Marañón

Sobre la cuenca de Marañón, se encuentran inmersos los lotes 192, 8 y 31-E, como se muestra en la figura 30, a continuación:

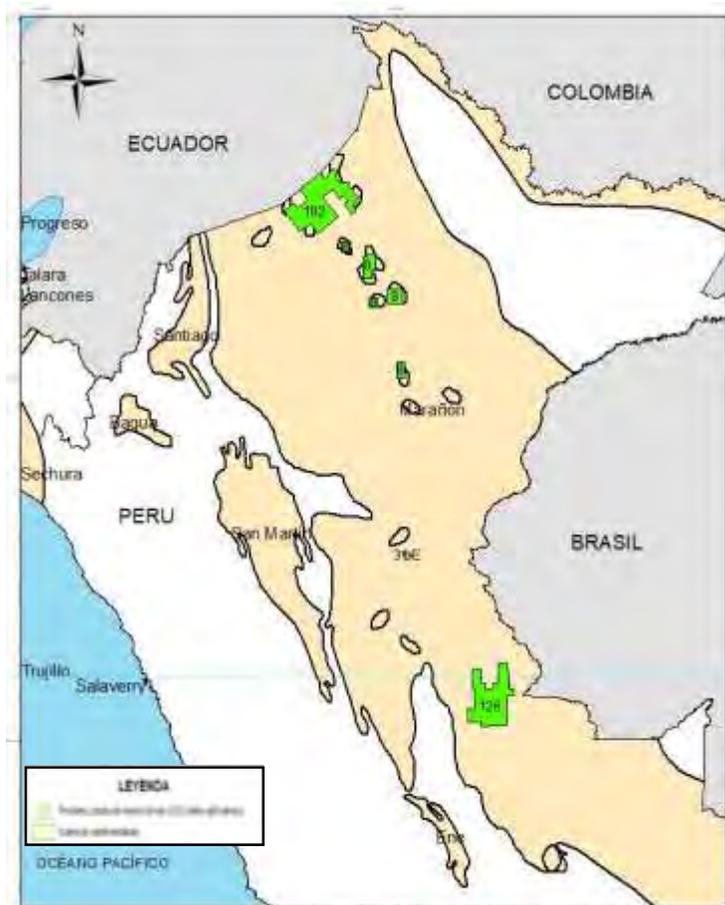


Figura 30: Mapa de lotes considerados en la Cuenca sedimentaria de Marañón – Ucayali – Madre de Dios y pozos cercanos. Fuente: Perú Petro.

La cuenca sedimentaria de Marañón es una cuenca larga que se extiende desde la cuenca de Ucayali hasta Colombia y Ecuador (Wine & Leader, 2002).

En cuanto a las fracturas y fallas consideradas en esta región, se considera una descripción de pobremente fracturada, pocas fallas (Llamas & Cienfuegos, 2012), a comparación de la cuenca de Talara, como se observa en la figura 31.

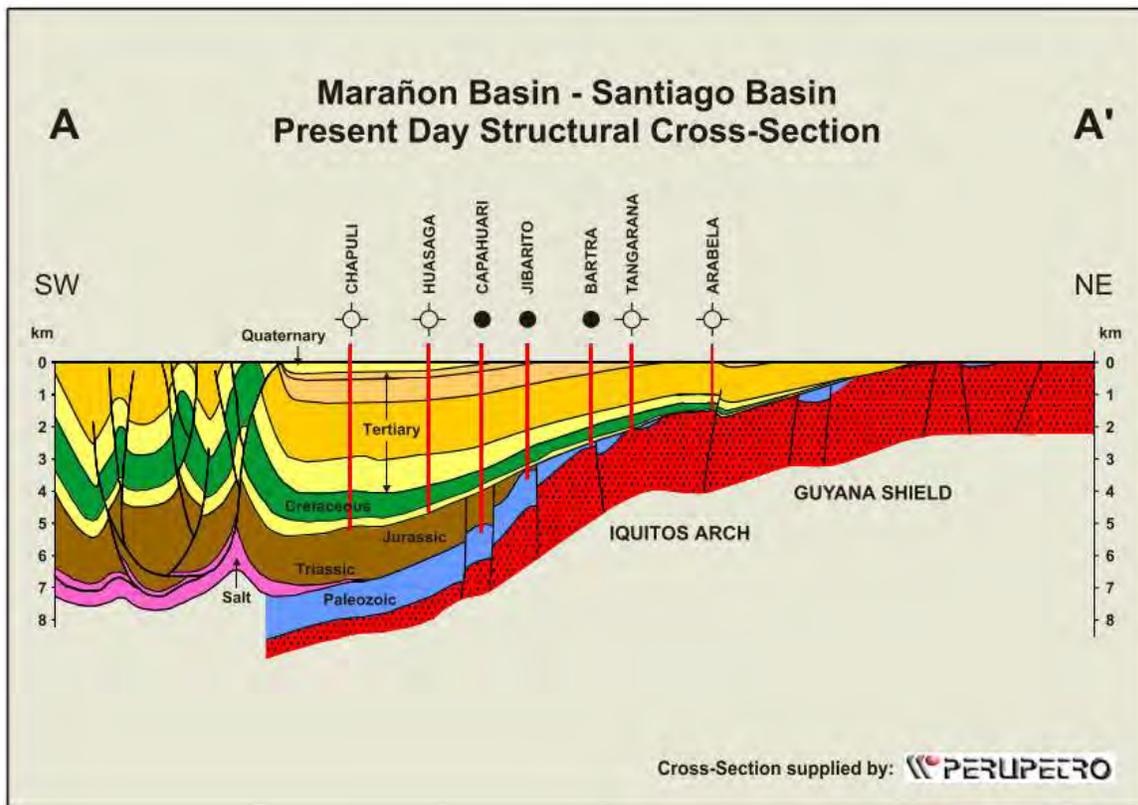


Figura 31: Sección transversal de la Cuenca de Marañón, en dirección suroeste – noreste. Fuente: Dan, 2002.

- Como se observa en la figura, sobre el arco de Iquitos, en dirección noreste de la sección cruzada se aprecia una secuencia de formaciones más continua. Según Llamas y Cienfuegos, el valor numérico correspondiente para los sectores que se encuentran en esta cuenca es de 7.

La capa tomada en consideración para la inyección geológica de CO₂, en la cuenca de Marañón, será la de Vivian superior, ya que es una formación productora de petróleo y de gas en gran volumen (figura 32):

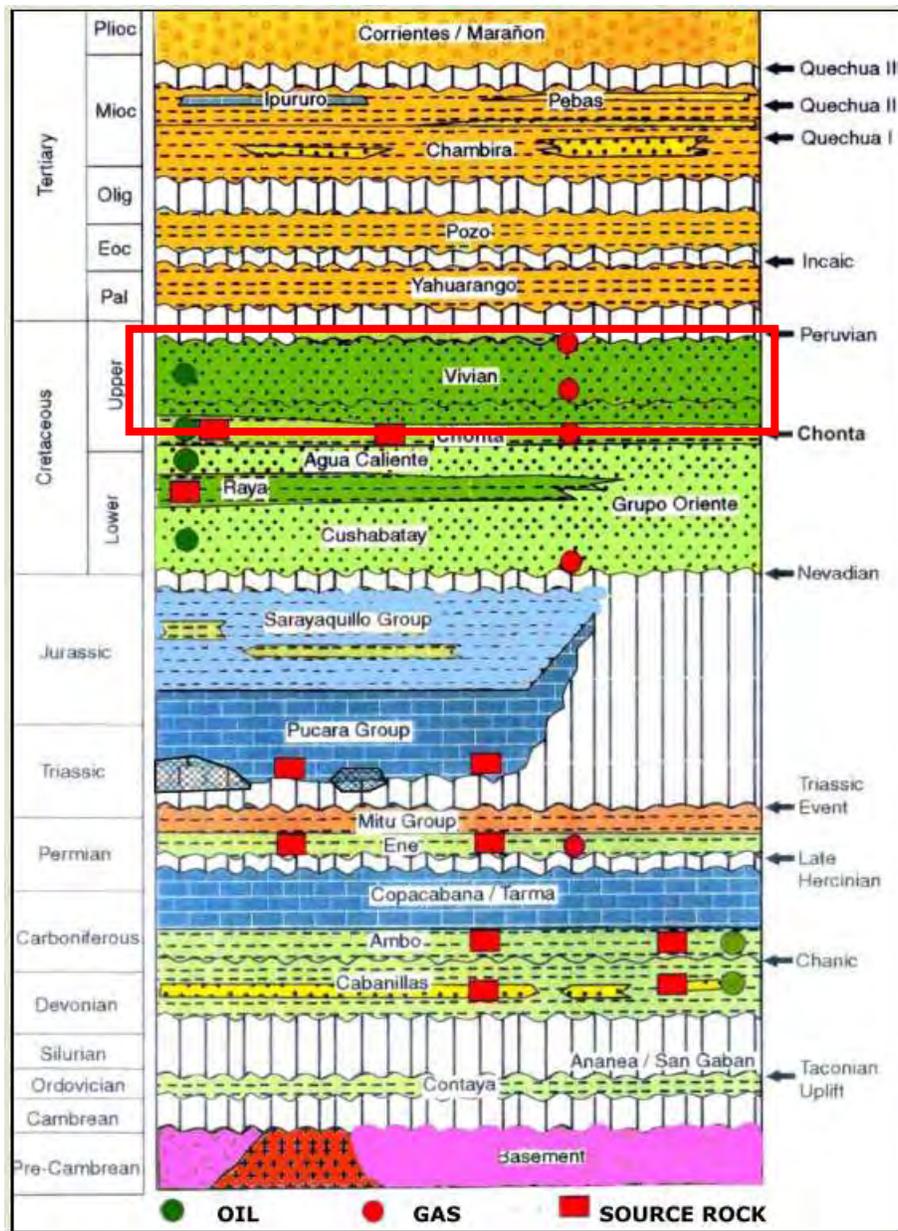


Figura 32: Columna estratigráfica generalizada en las cuencas de Marañón, Ucayali y Madre de Dios.

Fuente: Mathalone & Montoya, 1995.

Como se indicó, se considerará la capa Vivian superior como la indicada para evaluar la posibilidad de inyección geológica de CO₂, ya que, encima de esta, se establece una capa sello (yahuarango). Según los reportes de Perú Petro, en el caso del lote 8 y 192, el reservorio presente es Vivian mientras que en el lote 31-E la formación relevante considerada será la de Cachiyacu. Así la formación de areniscas de Vivian superior contiene una gran calidad de

reservorio y factores de recuperación altos (Dan, 2002). En función de los reportes se obtuvo la siguiente información:

Tabla 16.

Porosidades y valoraciones de lotes en Cuenca Marañon

Lote	Porosidad	Fuente	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
192	17%	Estudio geológico formación Vivian Lote 1AB p28	5
8	20-23%	ITP25463, pag 6	5
31-E	(Cachiyacu) 18-26%.	ITP25195, pag 28 - ITP25393, pag 12	9

Por otro lado, según Dan, la permeabilidad de la formación Vivian superior es alta, con valores comúnmente mayores a 1D, (2002). De la misma forma los valores de permeabilidad son como se muestran en la tabla 17.

Tabla 17.

Permeabilidades y valores asociados en Cuenca Marañon

Lote	Permeabilidad	Fuente	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
192	300 mD	Estudio geológico Fm Vivian Lote 1AB p28	7
8	1500-2500 mD	ITP25463, pág. 6	9
31-E	280-300 Md	ITP25393, pág. 12. ITP25700, pág. 5-6	7

Con respecto al espesor y la profundidad de tope del reservorio, ya que se trata de 2 formaciones diferentes, los datos requeridos también lo serán. Según los reportes entregados por Perú Petro, se obtuvo la siguiente información:

Tabla 18.

Espesor y profundidad tope de reservorio de lotes en Cuenca Marañon

Lote	Espesor	Fuente	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
192	28-90m	Estudio geológico Fm Vivian Lote 1AB p28-29	5
8	140m	ITP25463, p6	9
31-E	150m	ITP25393, p10	9

18 (a)

Lote	Profundidad de tope	Fuente	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
192	2240-3380m	ITP24329 p45, p48	7
8	2800m	ITP25463, p26	7
31-E	946m	ITP25700, p5	9

18 (b)

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

- Con respecto al valor de la temperatura, el gradiente geotérmico presente en la cuenca está en un rango de 25-30 °C/km, que según la figura 26, configura para definirse como una “cuenca fría”, cuya valoración numérica, según la tabla 7, es de 7.

Sobre la capacidad de almacenamiento, las areniscas presentes en la formación de Vivian contemplan valores superiores al 60% de las reservas descubiertas a la fecha (Dan, 2002) 459 mmbo. En el caso de los lotes estudiados, se registraron los parámetros en la tabla 19.

Tabla 19.

Capacidad de almacenamiento y valoración de lotes en Cuenca Marañon

Lote	Capacidad de almacenamiento	Fuente	Valoración numérica de Llamas & Cienfuegos
192	600 MMBO	ITP24329 p12, p19, p20, p27	9
8	42.78 MMBO	ITP25463, pag 8	1
31-E	1.6 MMBO	ITP25393, pag 16	1

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

- En cuanto a la capa sello considerada (Yahuarango), la formación está compuesta por lutitas (figura 32). Los espesores se calcularon a partir de las profundidades de tope de las capas. Así, para los lotes 192, 8 y 31-E, la formación sello Yahuarango tiene un espesor de 50 metros, 350 metros y 50 metros, a quienes se les atribuye el valor de 7,9 y 7 respectivamente.
- Ya que su litología está representada también por lutitas, como se mencionó anteriormente, la porosidad se encuentra en un rango de 0.1-0.4, a quien le corresponde un valor numérico de 9, según la tabla 7.
- De la misma forma, el parámetro de plasticidad se considera dúctil, debido a la presencia de partículas de arcilla en la composición de las lutitas. Así, el valor numérico asociado es 9.

Para valorar la calidad de la información que se tiene a cerca de la cuenca de Marañon, se presenta la figura 33:



Figura 33. Mapa de lotes de contrato y pozos exploratorios del Perú. Fuente: Perú Petro, 2018

- A diferencia de la cuenca de Talara, la cuenca de Marañón no presenta una cantidad significativa de pozos en su extensión. No obstante, los reportes de Perú Petro contienen cuantiosa información de pozos ubicados en dicho lote, aunque aisladamente. En consecuencia, se consideró que existe información generalizada, data detallada y suficiente profundidad (Llamas & Cienfuegos, 2012), que, según la tabla 7, tienen un valor de cinco.
- En cuanto al peligro sísmico, se valora a cada región según la figura 17. Como se observa, los lotes tomados en consideración se encuentran dentro de la zona sísmica Z2, que para el presente criterio considera una valoración de tres.
- Como se presentó en la figura 27, se observa que las distancias de los lotes 192, 8 y 31E hacia las áreas protegidas, consideradas en el proyecto, son muy cortas en el caso de los dos primeros lotes y de aproximadamente cinco kilómetros en el tercer caso, cuyas valoraciones corresponden a 1, 1 y 5 respectivamente, según la tabla 7.
- Con respecto a la cantidad de núcleos poblacionales, como se observa en la figura 20, el lote 192 contiene 15 puntos, mientras que el lote 8 presenta un rango de 1-9 puntos

y, finalmente el lote 31-E, contiene un punto. Para dichos valores, según la tabla 7, los números asignados son 3, 5 y 9.

- Sobre la distancia hacia restos arqueológicos, como se observa en la figura 28, los tres lotes considerados en la cuenca de Marañón se encuentran alejados a una distancia superior a los 20 kilómetros, por lo que según la tabla 7, su valores numéricos están representados por 9.
- La región Loreto, según la figura 19, cuenta también con un nivel intermedio de ocurrencia de conflictos sociales. En consecuencia, según la tabla 6, las valoraciones numéricas de dicho parámetro, en los lotes presentes en la cuenca del Marañón, son de 5.
- La accesibilidad a los lotes de la cuenca del Marañón puede ser interpretada en la figura 18. Según este, si bien existe una buena intención de acceso a dichos lotes, se encuentran alejados de las ciudades principales y su conectividad no es transversal, en cuanto a las vías nacionales. Su descripción podría configurarse como accesibilidad intermedia, cuya valoración numérica es 5, según la tabla 7.
- Con respecto al clima, la región Loreto, está considerada como selva tropical muy húmeda (Senamhi, 2018). Además, por ejemplo, en el mes de noviembre, se producen fenómenos naturales meteorológicos peligrosos, como se observa en la figura 34. De esta manera, se considerará el parámetro clima, como extremo, cuya valoración corresponde a 3 (Llamas & Cienfuegos, 2012), para los lotes de la cuenca de Marañón.

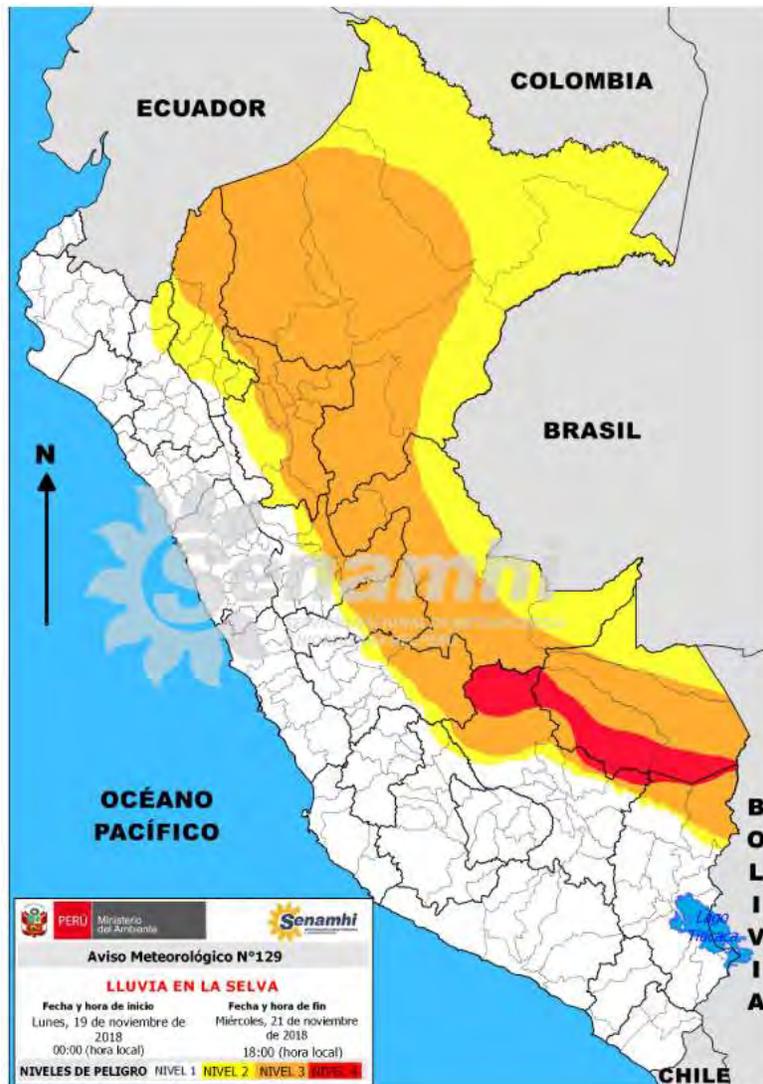


Figura 34: Lluvia en la selva, noviembre 2018. Fuente: Senamhi.

- El parámetro “nueva infraestructura” considerado para la cuenca de Marañón, de la misma manera, tiene una descripción de “poca” o nula, cuya valoración numérica es 3, según la tabla 7. Esto se debe a que no se cuenta con registros de experiencias pasadas sobre EOR en los campos de los lotes considerados en la cuenca de Marañón; sin embargo, se explotan campos petroleros. Así, la nueva infraestructura requerida para la implementación de CCS no sería cuantiosa.

A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores numéricos establecidos para los parámetros de cada lote de la cuenca Marañón:

Tabla 20.

Cuadro resumen de la evaluación numérica de los criterios considerados para los lotes petroleros de la cuenca de Marañón

Cuenca Marañón		Lote 192	Lote 8	Lote 31-E
Parámetros	Dirección y buzamiento de fracturas y fallas	7	7	7
	Porosidad (reservorio)	5	5	9
	Permeabilidad (reservorio)	7	9	7
	Tipo de litología (reservorio)	9	9	9
	Espesor formación (reservorio)	5	9	9
	Profundidad (reservorio)	7	7	1
	Temperatura	7	7	7
	Capacidad de Almacenamiento (reservorio)	9	1	1
	Porosidad (sello)	9	9	9
	Plasticidad (sello)	9	9	9
	Espesor de formación (sello)	7	9	7
	Disponibilidad y calidad de datos existentes de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc.	5	5	5
	Peligro sísmico	3	3	3
	Cercanía a zonas protegidas, ecosistemas frágiles hábitats de especies endémicas y vulnerables	1	1	5
	Cantidad de núcleos poblacionales	3	5	9
	Distancia recurso cultural	9	9	9
	Existencia de conflictos por actividades extractivas	5	5	5
	Accesibilidad	5	5	5
	Clima	3	3	3
	Nueva infraestructura	3	3	3
Presencia de gas o petróleo	7	7	7	
Masivos salinos	3	3	3	
Betas de carbono	3	3	3	

4.5.4 Cuenca Ucayali

- Sobre la cuenca de Ucayali, se encuentra el lote 126. Ya que las distribuciones de las unidades geológicas en la cuenca del Marañón se mantienen relativamente continuas con respecto a las de la cuenca de Ucayali, como se observa en la figura 31, puede considerarse la misma naturaleza de fractura o fallas de la cuenca de Marañón: débilmente fracturada, sin muchas fallas, descripción cuya valoración numérica es de 7.
- De la misma forma, la uniformidad de las unidades geológicas correspondientes, permiten definir a Vivian como la unidad de reservorio y a Yahuarango como la formación sello. Particularmente, en el caso del lote 126, los datos de porosidad y permeabilidad se obtuvieron a partir de la formación de Vivian, mientras que por ejemplo el valor de la capacidad de almacenamiento se obtuvo de reportes de la formación de aguas calientes & la colpa. En consecuencia, se obtuvo la siguiente tabla resumen de los datos mencionados:

Tabla 21.

Porosidad, permeabilidad, espesor, profundidad y capacidad de almacenamiento del lote 126 y sus valoraciones.

Lote 126			
Parámetro	Descripción	Fuente (*)	Valoración de Llamas & Cienfuegos
Porosidad	"Buena porosidad"	ITP24924, p36	9
Permeabilidad	"Buena permeabilidad" -Vivian	ITP24924, p36	9
Espesor de formación	20-60-150m	ITP24924, p35	5
Profundidad de tope	registros de 170m	ITP24924, p35	1
Capacidad de almacenamiento	70.85 MMBO formación Aguas Calientes & La Colpa	ITP22868 p72	3

(*) Los datos presentados forman parte de la base de datos que Perú Petro entregó al equipo de investigación mediante la carta de transferencia GGRL-TERI-GFBD-067-2018

- Asimismo, el valor de disponibilidad de información puede definirse con respecto a la figura 33. Como se observa, existe poca presencia de pozos. Esto haría suponer la poca información con respecto al lote de la cuenca de Ucayali. La descripción, para este parámetro se eligió como poca data, con posibilidad de realizar interpretaciones mediante información de cuencas adyacentes. Esta descripción comprende una valoración numérica de 3.
- El peligro sísmico está determinado por la figura 17, del reglamento nacional de edificaciones. Según este, el lote 126 se encontraría en la zona Z2, cuya valoración numérica, según la tabla 7 es de 3.
- Con respecto a la cercanía a zonas protegidas, según la figura 27, el lote 126 se encuentra a una distancia aproximada de 5 kilómetros de la zona protegida más cercana, en este caso una zona de amortiguamiento. Según la tabla 7, dicha descripción tendría una valoración de 3.
- La cantidad de núcleos poblacionales dentro del lote 126 corresponde a 18, como se observa en la figura 20. Según la tabla 7, dicha descripción obtendría una valoración de 3.
- La distancia a los recursos culturales, en este caso hacia los restos arqueológicos, puede apreciarse en la figura 28. Según este, el más cercano al lote 126 se encuentra a más de 20 kilómetros de distancia, lo cual tiene una valoración numérica de 9.
- En cuanto a la accesibilidad, como se observa en la figura 18, el lote 126 tiene presencia de una carretera departamental transversal. Se aprecia también poca conectividad con las demás ciudades. En consecuencia, el traslado de CO₂ a dicho emplazamiento supondría una gran inversión económica. La valoración numérica, según la tabla 7, para este aspecto es 9.
- Con respecto al clima, la región Ucayali, está considerada como selva tropical muy húmeda (Senamhi, 2018). Según la figura 34, partes de la región Ucayali están categorizadas dentro del nivel 2 y 3 de peligro. Similarmente, se considerará el parámetro clima, como extremo, cuya valoración corresponde a 3 (Llamas & Cienfuegos, 2012), para los lotes de la cuenca de Ucayali

- El parámetro “nueva infraestructura” considerado para la cuenca de Ucayali, tiene también una descripción de “poca” o nula, con una valoración matemática de 3, ya que no se cuenta con registros de experiencias pasadas sobre EOR en los campos del lote considerado en la cuenca de Ucayali. A continuación, se presenta una tabla resumen con los valores numéricos establecidos para los parámetros de cada lote de la cuenca Ucayali:

Tabla 22.

Cuadro resumen de la evaluación numérica de los criterios considerados para los lotes petroleros de Ucayali

Cuenca Ucayali		Lote 126
Parámetros	Dirección y buzamiento de fracturas y fallas	7
	Porosidad	9
	Permeabilidad	9
	Tipo de litología	9
	Espesor formación	5
	Profundidad	1
	Temperatura	7
	Capacidad de Almacenamiento	3
	Porosidad	9
	Permeabilidad	9
	Espesor de formación	7
	Disponibilidad y calidad de datos existentes de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc.	3
	Peligro sísmico	3
	Cercanía a zonas protegidas, ecosistemas frágiles hábitats de especies endémicas y vulnerables	3
	Cantidad de núcleos poblacionales	3
	Distancia recurso cultural	9
	Existencia de conflictos por actividades extractivas	9
Accesibilidad	9	
Clima	3	

Nueva infraestructura	3
Presencia de gas o petróleo	7
Masivos salinos	3
Betas de carbono	3

4.6 MCDM para la selección de sitios para proyectos de inyección geológica de CO₂, a partir de método TOPSIS.

La tabla 2 y tabla 3 representan las valoraciones numéricas que se asignan a las descripciones de criterios tomados en consideración por los autores Llamas y Cienfuegos. Estas valoraciones están representadas por una escala impar entre 1 y 9, donde 9 representa el mejor escenario y 1 el menos óptimo. Estos parámetros son tomados en cuenta en la presente investigación. Adicionalmente, en el taller participativo desarrollado, se evaluaron diferentes criterios y se determinó la importancia de cada uno de ellos. El proyecto abarca los parámetros más importantes y acordes al proyecto, pactados en dicho taller.

En función de la información sobre diferentes parámetros a los considerados por Llamas y Cienfuegos, se estableció similarmente una escala de valores numéricos impares entre 1 y 9, para comprender el mismo rango de los autores. Para cada criterio seleccionado, en contraste, se estableció el valor de 9 para los escenarios menos óptimos, y 1 para el más óptimo. Así, los parámetros considerados por Llamas y Cienfuegos comprenden una escala de orden de aspectos favorables y, los nuevos criterios comprenden una de aspectos desfavorables, para la elección del mejor sitio potencial para la inyección geológica de CO₂. En consecuencia, se decidió la aplicación del método TOPSIS, que establezca un orden de preferencias, en base de la similitud a la solución ideal. Así el lote que represente la mejor opción para la ubicación de posibles proyectos de inyección geológica de CO₂ es aquel que está más cercano a la solución ideal y más alejado de la solución adversa. La valoración numérica para el total de parámetros considerados es como se muestra en la tabla 7.

Para el correcto desarrollo del método TOPSIS, es necesario el establecimiento de las importancias de cada uno de los parámetros. En el taller participativo, los expertos establecieron evaluaciones y validaciones de parámetros que resultaron en un cuadro global de valores acordados de importancia como se observa en la tabla 6. Finalmente, los valores

acordados de todos los parámetros considerados para la investigación y sus respectivas importancias o ponderaciones se presentan en la tabla 23:

Tabla 23.

Valores acordados y ponderaciones de los parámetros considerados en el proyecto de investigación

	Criterio considerado	Valor acordado	Ponderación
C1	Dirección y buzamiento de fracturas y fallas	0.60	0.0385
C2	Porosidad (reservorio)	0.66	0.0428
C3	Permeabilidad (reservorio)	0.70	0.0454
C4	Tipo de litología (reservorio)	0.70	0.0454
C5	Espesor formación (reservorio)	0.66	0.0428
C6	Profundidad (reservorio)	0.66	0.0428
C7	Temperatura	0.66	0.0428
C8	Capacidad de Almacenamiento	0.66	0.0428
C9	Porosidad (sello)	0.61	0.0395
C10	Plasticidad (sello)	0.66	0.0428
C11	Espesor de formación (sello)	0.70	0.0454
C12	Disponibilidad y calidad de datos existentes de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc.	0.7	0.0454
C13	Peligro sísmico	0.61	0.0395
C14	Cercanía a zonas protegidas, ecosistemas frágiles hábitats de especies endémicas y vulnerables	0.61	0.0395
C15	Distancia a núcleos sensibles poblacionales y a poblaciones vulnerables	0.66	0.0428
C16	Distancia recurso cultural	0.61	0.0395
C17	Existencia de conflictos por actividades extractivas	0.61	0.0395
C18	Distancia a fuente emisora	0.7	0.0454
C19	Clima	0.57	0.0369
C20	Nueva infraestructura	0.7	0.0454
C21	Presencia de gas o petróleo	0.8	0.0518
C22	Masivos salinos	0.8	0.0518
C23	Betas de carbono	0.8	0.0518

Una vez establecidas las ponderaciones de cada parámetro, se prosiguió a armar la matriz general cuyos elementos están representados por los valores numéricos presentes en la tabla 13, tabla 15, tabla 20 y tabla 22 que se definieron para cada criterio de los lotes. Así, se obtuvo la tabla 24, que representa la matriz general del método TOPSIS para determinar la mejor opción para ubicar proyectos de inyección geológica de CO₂ en el Perú:

Tabla 24.

Matriz general de valores numéricos de los criterios considerados

Criterio	Lotes, cuenca Talara							Lotes, cuenca Sechura		Lotes, cuenca Marañón			Cuenca Ucayali
	X	II	XV	VI	IX	I	VII	XIII	XXI	192	8	31-E	126
C1	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	7	7	7
C2	1	1	5	5	5	5	5	5	5	5	5	9	9
C3	5	1	5	1	5	7	1	5	9	7	9	7	9
C4	3	3	3	3	3	3	3	3	3	7	7	7	7
C5	9	9	5	7	9	9	7	7	9	5	9	9	7
C6	9	9	7	7	1	7	7	9	5	7	7	9	1
C7	5	5	5	5	5	5	5	5	5	7	7	5	5
C8	3	3	3	1	1	1	1	1	1	9	1	1	3
C9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
C10	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
C11	9	9	9	9	9	9	9	9	9	7	9	7	9
C12	9	9	9	9	9	9	9	3	3	5	5	5	3
C13	9	9	9	9	9	9	9	9	9	3	3	3	3
C14	5	3	3	9	9	9	9	9	9	1	1	5	5
C15	5	9	9	7	9	5	7	1	5	3	5	9	3
C16	9	9	9	9	9	9	9	1	9	9	9	9	9
C17	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	3
C18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	5	5	5	9
C19	7	7	7	7	7	7	7	7	7	3	3	3	3
C20	5	5	5	5	5	9	5	5	5	5	5	5	5
C21	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
C22	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
C23	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

Con la matriz general definida, se prosiguió a hallar la matriz normalizada. Cada valor de esta matriz se obtuvo como el cociente entre el valor del mismo orden en la matriz generalizada y la raíz cuadrada de la suma de cuadrados de los valores de fila del mismo orden, en la matriz generalizada. Así, se obtuvo la tabla 25:

Tabla 25.

Matriz normalizada

Criterio	Cuenca Talara							Cuenca Sechura		Cuenca Marañon			Cuenca Ucayali
	X	II	XV	VI	IX	I	VII	XIII	XXI	192	8	31-E	126
C1	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.18	0.42	0.42	0.42	0.42
C2	0.05	0.05	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.46	0.46
C3	0.23	0.05	0.23	0.05	0.23	0.32	0.05	0.23	0.41	0.32	0.41	0.32	0.41
C4	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
C5	0.32	0.32	0.18	0.25	0.32	0.32	0.25	0.25	0.32	0.18	0.32	0.32	0.18
C6	0.35	0.35	0.28	0.28	0.04	0.28	0.28	0.35	0.20	0.28	0.28	0.35	0.04
C7	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.35	0.35	0.35	0.25
C8	0.27	0.27	0.27	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.80	0.09	0.09	0.27
C9	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
C10	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
C11	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.22	0.29	0.22	0.29
C12	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.12	0.12	0.19	0.19	0.19	0.12
C13	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33	0.11	0.11	0.11	0.11
C14	0.21	0.13	0.13	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.38	0.04	0.04	0.21	0.13
C15	0.21	0.39	0.39	0.30	0.39	0.21	0.30	0.04	0.21	0.13	0.21	0.39	0.13
C16	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.03	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29
C17	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.00	0.26	0.26	0.26	0.48
C18	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.39	0.39	0.39	0.70
C19	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.32	0.14	0.14	0.14	0.14
C20	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.43	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26
C21	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
C22	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28
C23	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28

A continuación, se calculó la matriz normalizada ponderada. Los elementos de esta se calculan como el producto de la matriz normalizada por los valores de ponderación de cada criterio. Así, se obtuvo la tabla 26:

Tabla 26.

Matriz normalizada ponderada

Criterio	Cuenca Talara							Cuenca Sechura		Cuenca Marañón			Cuenca Ucayali
	X	II	XV	VI	IX	I	VII	XIII	XXI	192	8	31-E	126
C1	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0069	0.0162	0.0162	0.0162	0.0162
C2	0.0022	0.0022	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0195	0.0195
C3	0.0102	0.0020	0.0102	0.0020	0.0102	0.0143	0.0020	0.0102	0.0184	0.0143	0.0184	0.0143	0.0184
C4	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126	0.0126
C5	0.0137	0.0137	0.0076	0.0107	0.0137	0.0137	0.0107	0.0107	0.0137	0.0076	0.0137	0.0137	0.0076
C6	0.0152	0.0152	0.0118	0.0118	0.0017	0.0118	0.0118	0.0152	0.0084	0.0118	0.0118	0.0152	0.0017
C7	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0108	0.0151	0.0151	0.0151	0.0108
C8	0.0115	0.0115	0.0115	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0346	0.0038	0.0038	0.0115
C9	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111	0.0111
C10	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119	0.0119
C11	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0101	0.0130	0.0101	0.0130
C12	0.0157	0.0157	0.0157	0.0157	0.0157	0.0157	0.0157	0.0052	0.0052	0.0087	0.0087	0.0087	0.0052
C13	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0130	0.0043	0.0043	0.0043	0.0043
C14	0.0084	0.0050	0.0050	0.0151	0.0151	0.0151	0.0151	0.0151	0.0151	0.0017	0.0017	0.0084	0.0050
C15	0.0092	0.0165	0.0165	0.0129	0.0165	0.0092	0.0129	0.0018	0.0092	0.0055	0.0092	0.0165	0.0055
C16	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0013	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114	0.0114
C17	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0105	0.0000	0.0105	0.0105	0.0105	0.0189
C18	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0035	0.0177	0.0177	0.0177	0.0318
C19	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0051	0.0051	0.0051	0.0051
C20	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0197	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118	0.0118
C21	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144
C22	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144
C23	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144	0.0144

Luego, se prosiguió a definir los valores ideales positivos y los valores ideales negativos de cada criterio. Estos se concibieron de manera distinta en función de los criterios favorables y

de los desfavorables. Por un lado, en el caso de los criterios desfavorables, es decir los criterios C13 – peligros naturales, C17 – existencia de conflictos por actividades extractivas y C18 - accesibilidad, el valor ideal positivo se determina como el mínimo valor numérico de cada fila y el valor ideal negativo se define como el máximo valor numérico de la fila. Por otro lado, en el caso de los criterios favorables, el valor ideal positivo se determina como el máximo valor numérico de la fila y el valor ideal negativo se define como el mínimo valor numérico de la misma. De esta forma, se obtuvo los valores ideales positivos y negativos de cada criterio, como se observa en la tabla 27.

Tabla 27.

Valores ideales positivos y negativos para cada criterio

Criterio	IDEAL POSITIVO	IDEAL NEGATIVO
C1	0.0162	0.0069
C2	0.0195	0.0022
C3	0.0184	0.0020
C4	0.0126	0.0126
C5	0.0137	0.0076
C6	0.0152	0.0017
C7	0.0151	0.0108
C8	0.0346	0.0038
C9	0.0111	0.0111
C10	0.0119	0.0119
C11	0.0130	0.0101
C12	0.0157	0.0052
C13	0.0043	0.0130
C14	0.0151	0.0017
C15	0.0165	0.0018
C16	0.0114	0.0013
C17	0.0000	0.0105
C18	0.0035	0.0177
C19	0.0118	0.0051
C20	0.0197	0.0118
C21	0.0144	0.0144

C22	0.0144	0.0144
C23	0.0144	0.0144

Una vez definidos los valores ideales positivos y negativos para todos los criterios considerados, se determinó la distancia euclidiana del ideal positivo (S^+) y la del ideal negativo (S^-). La distancia euclidiana del ideal positivo de cada lote se determinó como la suma de distancias de cada valor de columna de la matriz normalizada ponderada a cada valor ideal positivo definido. Paralelamente, la distancia euclidiana del ideal negativo de cada lote se calculó como la suma de distancias de cada valor de columna de la matriz normalizada ponderada a cada valor ideal negativo definido. De esta manera, se obtuvo la tabla 28:

Tabla 28.

Distancias euclidianas de los ideales positivos (S^+) y negativos (S^-)

	S+	S-
X (cuenca Talara)	0.037	0.0301
II (cuenca Talara)	0.039	0.0312
XV (cuenca Talara)	0.034	0.0316
VI (cuenca Talara)	0.041	0.0309
IX (cuenca Talara)	0.04	0.0323
I (cuenca Talara)	0.037	0.0336
VII (cuenca Talara)	0.041	0.0309
XIII (cuenca Sechura)	0.043	0.0277
XXI (cuenca Sechura)	0.038	0.0336
192 (cuenca Marañón)	0.03	0.0398
8 (Cuenca Marañón)	0.042	0.029
31-E (cuenca Marañón)	0.038	0.035
126 (Cuenca Ucayali)	0.049	0.0345

Finalmente, a partir de la tabla 28, se prosiguió a determinar la proximidad relativa para cada lote. Dicho valor representa el orden de preferencias de los resultados obtenidos. Se calculó como el cociente entre S^- y la suma de S^+ y S^- . Así, los valores obtenidos más cercanos a la unidad corresponden a los lotes con las mejores condiciones, en función de los criterios

considerados, para la posible ubicación de proyectos de inyección geológica de CO₂. En consecuencia, se obtuvo la tabla 29.

Tabla 29.

Proximidades relativas de cada lote a la solución ideal.

	Pi
X (cuenca Talara)	0.451
II (cuenca Talara)	0.441
XV (cuenca Talara)	0.479
VI (cuenca Talara)	0.430
IX (cuenca Talara)	0.445
I (cuenca Talara)	0.473
VII (cuenca Talara)	0.430
XIII (cuenca Sechura)	0.390
XXI (cuenca Sechura)	0.467
192 (cuenca Marañón)	0.568
8 (Cuenca Marañón)	0.410
31-E (cuenca Marañón)	0.476
126 (Cuenca Ucayali)	0.415

Como se observa en la tabla 29, el lote 192 tiene la proximidad relativa más cercana a la unidad. A continuación, se encuentran los lotes XV, 31-E y I respectivamente. En consecuencia, dichos lotes, en función de los criterios seleccionados, comprenderán las mejores condiciones para la posible ubicación de proyectos de inyección geológica de CO₂.

En función de la información pública existente y de las dimensiones y criterios considerados, en el Perú, los proyectos potenciales de inyección geológica de CO₂, como medida de mitigación ambiental, podrían establecerse de manera más óptima en la zona noroccidental del país, en la Cuenca Marañón – Ucayali. Adicionalmente, en el caso de la región nororiental del país, en la Cuenca de Talara, el lote priorizado con mejores condiciones es el lote XV, ubicado en Talara. En síntesis, las posibles zonas donde se podría realizar proyectos de inyección geológica de CO₂, según la herramienta de toma de decisiones TOPSIS, son los

lotes petroleros 192, XV, 31-E, I, XXI, X, IX, II, VI, VII, 126, 8, XIII, en ese orden de preferencia. La figura 35 representa las soluciones ideales de los casos estudiados para establecer un sitio para la posible ubicación de proyectos de inyección geológica de CO₂ en el Perú.

Según la ponderación realizada de los criterios, puede inferirse que los criterios considerados más relevantes para el establecimiento de proyectos de inyección geológica de CO₂ son aquellos geológicos que definen las características de reservorio y sello, y, por otro lado, la disponibilidad y calidad de información (estudios de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc.) son, sin duda alguna, muy importantes.





Figura 35: Mapa con orden de preferencias de sitios potenciales para proyectos de inyección geológica de CO₂ y criterios de evaluación importantes.

5 Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

En el marco de fijar las diversas áreas con potencial para establecer proyectos de inyección geológica de CO₂, en el Perú, se concluye lo siguiente:

- De la revisión y el análisis del marco teórico correspondiente a los proyectos de captura, transporte y almacenamiento de carbono (CCS), se concluye que los proyectos de almacenamiento geológico de CO₂ son factibles en yacimientos de petróleo agotados o en la recuperación secundaria del mismo.
- A partir de los parámetros, criterios y dimensiones que se utilizaron en el proyecto y también en los dos talleres participativos en Lima y Piura, se concluye que aquellos que son más relevantes para la identificación de los sectores potenciales de almacenamiento son, por un lado, los parámetros técnicos de reservorio como porosidad, permeabilidad, espesor, profundidad, etc. y , por otro lado, los parámetros socio económicos como la cercanía a áreas protegidas, conflictos sociales, accesibilidad, etc.
- En función de la evaluación del potencial de diferentes zonas al interior del país donde se podría realizar la inyección geológica CO₂ como una medida de mitigación ambiental, se concluye que, mediante la aplicación y desarrollo de una zonificación y de la técnica de análisis multicriterio TOPSIS, los lotes con mejores condiciones donde el almacenamiento geológico de CO₂ podría desarrollarse son los siguiente: 192, XV, 31-E, I, XXI, X, IX, II, VI, VII, 126, 8, XIII, en ese orden respectivo.
- De la elaboración del mapa del Perú, de manera jerarquizada, con las locaciones potenciales donde se podría desarrollar la inyección geológica de CO₂, figura 35, se concluye que, de la totalidad de lotes evaluados, aquel que contendría las mejores condiciones se encuentra en el sector norte de la región Loreto; no obstante, los demás lotes se encuentran acomodados en Piura. En consecuencia, esta última región comprendería las mejores posibilidades para potenciales proyectos de almacenamiento geológico de CO₂.

5.2 Recomendaciones

- Debido a los alcances del proyecto, en la evaluación inicial de zonas, no se consideraron como potenciales zonas de inyección geológica de CO₂ a aquellos lotes petroleros ubicados mar adentro ni a aquellos que al momento de la investigación se encontraban en la condición de evaluación técnica.
- Si bien el lote 192 resultó con las mejores condiciones para la ubicación de proyectos de inyección geológica de CO₂ según los criterios considerados, debe de tomarse especial atención al hecho de que la extensión de dicho lote limita con Colombia y también a la logística que debería aplicarse para eventuales proyectos de almacenamiento geológico de CO₂, en dicho emplazamiento.
- Los tipos de reservorio, para establecer proyectos de almacenamiento geológico de CO₂, comprenden a los acuíferos salinos, reservorios de gas o petróleo en explotación o agotados y betas de carbono. En la presente investigación, la evaluación de criterios se desarrolló para diferentes lotes que contemplan reservorios de petróleo y/o gas. La información existente concerniente a los otros tipos de depósitos, a nivel nacional, es desarrollada a una profundidad tal que no respeta el valor mínimo para el cual podría capturarse el CO₂ en su estado supercrítico o, simplemente la información es escasa.
- De manera preliminar, el factor social considerado en la investigación está definido por el número de incidentes - conflictos sociales ocurridos en las regiones del país. Dicho factor representa de manera indirecta la percepción social de la población ante un nuevo proyecto. En el futuro, se realizará una encuesta de percepción en la región dónde se encuentren los sitios con mejores condiciones para la inyección.
- Dado que los lotes representan unidades vastas de referencia, los parámetros técnicos de reservorio y de sello se obtuvieron, mayoritariamente a través de rangos y/o valores promedio de los diferentes pozos presentes en los lotes analizados. En otros casos, parámetros como por ejemplo la capacidad de almacenamiento se obtuvo en función del valor total estimado de producción del lote.
- En algunos lotes, la información que los comprende es extensa y abarca diferentes pozos dentro de los mismos, mientras que en otros la información obtenida solo representa a un pozo dentro de toda la extensión del lote. En los primeros, se puede encontrar un valor característico del parámetro. Sin embargo, en aquellos con poca

información se considerarán algunos parámetros de dicho pozo como representativos de toda la extensión del lote.

5.3 Discusión de resultados

Frente a la carencia de antecedentes de este tipo de investigaciones en el Perú, la presente investigación contribuye de manera significativa al campo del almacenamiento geológico de CO₂ en el país, como una medida de mitigación ambiental.

Según la investigación liderada por Deveci y otros colaboradores en el 2015, el método TOPSIS puede entregar resultados exitosos para la selección de locaciones donde puede desarrollarse el almacenamiento geológico del CO₂.

En cuanto al proyecto propio, antes de elegir al método Topsis como la herramienta de decisión multicriterio (MCDM), se utilizaron valores numéricos determinados por los autores Llamas y Cienfuegos para otorgarle un nivel de importancia a cada criterio considerado. Los resultados determinados por el método coinciden de manera preliminar con aquellos estimados en el inicio del proyecto: lotes petroleros de la costa norte del Perú, como regiones potenciales para almacenar geológicamente el CO₂. Así el MCDM realizado a partir del método Topsis resultó una buena estrategia para priorizar los yacimientos y se alineó con los diseños metodológicos aplicados en investigaciones previas.

En ese sentido, la metodología desarrollada en el presente trabajo de investigación puede servir como punto de partida en investigaciones similares a desarrollarse dentro del Perú o también en regiones adyacentes.

6 Bibliografía

- Bachu, S. (2003). Screening and ranking of sedimentary basins for sequestration of CO₂ in geological media in response to climate change, 277–289. <https://doi.org/10.1007/s00254-003-0762-9>
- Benson, S. M., & Orr, F. M. (2008). Carbon dioxide capture and sequestration. *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*, 33(April), 303–305. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511718786.010>
- Bianchi, C. (2002). SISTEMA PETROLERO, MECANISMOS DE ENTRAMPAMIENTO DE FLUIDOS EN EL CAMPO LITORAL. CUENCA TALARA - NOR OESTE DEL PERU, 2002.
- Bjørlykke, K. (2015). Petroleum geoscience: From sedimentary environments to rock physics, second edition. *Petroleum Geoscience: From Sedimentary Environments to Rock Physics, Second Edition*, 1–662. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-34132-8>
- Bui, M., Adjiman, C. S., Bardow, A., Anthony, E. J., Boston, A., Brown, S., ... Mac Dowell, N. (2018). Carbon capture and storage (CCS): the way forward. *Energy & Environmental Science*. <https://doi.org/10.1039/C7EE02342A>
- Dan, B. (2002). APPENDIX 4C Marañon Basin Hydrogeology Study.
- Deveci, M., Demirel, N. Ç., John, R., & Özcan, E. (2015). Fuzzy multi-criteria decision making for carbon dioxide geological storage in Turkey. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 27, 692–705. <https://doi.org/10.1016/j.jngse.2015.09.004>
- Folger, P. (2009). Carbon capture and sequestration. *ChemSusChem*, 3(8), 865–868. <https://doi.org/10.1002/cssc.201090032>

- Gough, C., & Shackley, S. (2006). Towards a multi-criteria methodology for assessment of geological carbon storage options, 141–174. <https://doi.org/10.1007/s10584-006-0425-4>
- Grataloup, S., Bonijoly, D., Brosse, E., Dreux, R., Garcia, D., Hasanov, V., ... Thoraval, A. (2009). A site selection methodology for CO₂ underground storage in deep saline aquifers: case of the Paris Basin. *Energy Procedia*, 1(1), 2929–2936. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2009.02.068>
- Herzog, H., & Golomb, D. A. N. (2004). Carbon Capture and Storage from Fossil Fuel Use, 1, 1–11. Retrieved from https://sequestration.mit.edu/pdf/encyclopedia_of_energy_article.pdf
- Higley, B. D. (2004). The Talara Basin Province of Northwestern Peru : Cretaceous-Tertiary Total Petroleum System.
- IEAGHG. (2014). CO₂ Pipeline Infrastructure, (January).
- Llamas, B., & Cienfuegos, P. (2012). Multicriteria Decision Methodology to Select Suitable Areas for Storing Co₂. *Energy & Environment*, 23(2–3), 249–264. <https://doi.org/10.1260/0958-305X.23.2-3.249>
- Mariño-martínez, J. E., & Moreno-reyes, L. E. (2018). Posibilidades de captura y almacenamiento geológico de CO₂ (CCS) en Colombia – caso Tauramena (Casanare), 40, 109–122. <https://doi.org/10.18273/revbol.v40n1-2018007.RESUMEN>
- Metz, B., Davidson, O., de Coninck, H., Loos, M., & Leo, M. (2005). *CARBON DIOXIDE CAPTURE AND STORAGE. Intergovernmental Panel on Climate Change* (Vol. 87). [https://doi.org/10.1016/S0022-3476\(75\)80125-9](https://doi.org/10.1016/S0022-3476(75)80125-9)
- Neuzil, C. E. (1994). How permeable are clays and shales, 30(2), 145–150.
- SERNANP. (1995). Informe 4: Áreas Naturales Protegidas del Perú, 12. Retrieved from <http://www.ibcperu.org/doc/isis/9532.pdf>

Wang, M., Lawal, A., Stephenson, P., Sidders, J., & Ramshaw, C. (2011). Post-combustion CO₂ capture with chemical absorption: A state-of-the-art review. *Chemical Engineering Research and Design*, 89(9), 1609–1624. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2010.11.005>

Wine, G., & Leader, P. (2002). MARAÑON BASIN Technical Report.

Zonas de amortiguamiento para conservación. (2008).

In Country NAP Support, Perú

2017 “Climate Change Impact in Peru”

International Institute for Sustainable Development, Winnipeg

WAARUM, Ivar. BLOMBERG, Ann. EEK, Espen. BROWN, Jock. ULFSNES, Amund. CARPENTER. Mike

2017 “CCS Leakage Detection Technology - Industry Needs, Government Regulations, and Sensor Performance”

Energy Procedia, Volume 114, Oslo, pp. 3613-3627

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610217316879>

KUBY, Michael. MIDDLETON, Richard. BIELICKI, Jeffrey.

2011 “Analysis of cost savings from networking pipelines in CCS infrastructure systems”

Energy Procedia, Volume 4, Minneapolis, pp. 2808-2815

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610211003821>

OZAKI, Masahiko. OHSUMI, Takashi. KAJIYAMA, Ryuichiro.

2013 “Ship-based Offshore CCS Featuring CO₂ Shuttle Ships Equipped with Injection Facilities”

Energy Procedia, Volume 37, Tokyo, pp 3184-3190

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610213004487>

COLE, Ivan. CORRIGAN, Penny. SIM, Samson. BIRBILIS, Nick
2011 “Corrosion of pipelines used for CO₂ transport in CCS: Is it a real problem?”
International Journal of Greenhouse Gas Control, Volume 5, pp. 749-756
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1750583611000703>

NOOTHOUT, Paul. WIERSMA, Frank. HURTADO, Omar. ROELOFSEN, Patrick.
MACDONALD, Doug
2014 “CO₂ Pipeline Infrastructure”
International Energy Agency, Report 2013/18, Cheltenham
https://ieaghg.org/docs/General_Docs/Reports/2013-18.pdf

Godshalk, D., Beatley, T., Berke, P., Brower, D., Kaiser, E., Bohl, C. Goebel, M. (1999)
Natural Hazard Mitigation: Recasting Disaster Policy and Planning pp 7

SGRD, CENEPRED, INDECI, MEF, CEPLAN. Plan Nacional de Gestión del Riesgo de
Desastres PLANAGERD 2014-2021 (2014) pp 19-30

Tavera, H. Evaluación del Peligro Asociado a los Sismos y Efectos Secundarios en Perú.
(2014) pp 6-23

House, K., Schrag, D., Harvey, C., Lackner K. Permanent Carbon Dioxide Storage in
Deep-Sea Sediments (2006) Vol 103 No 38 pp 2-10

TAN, Yuting. NOOKUEA, Worrada. LI, Hailong. THORING, Eva. YAN, Jinyue. (2016)
Property impacts on Carbon Capture and Storage (CCS) processes: A review.
Energy Conversion and Management 118 (2016) pp. 204-222



Figura 36: Documentación que garantiza información entregada a la PUCP.



GGRL-TERI-GFBD-067-2018

San Borja, 30 de noviembre del 2018

**DRA.
SANDRA SANTA CRUZ HIDALGO
DOCENTE - INVESTIGADORA
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
AV. UNIVERSITARIA 1801,
SAN MIGUEL – LIMA 32**

CARTA DE TRANSFERENCIA – LICENCIA DE USO

Por la presente manifestamos que la Dra. Sandra Santa Cruz Hidalgo docente investigadora de la **PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**, recibirá sin costo, la información técnica detallada en el Anexo I con el propósito de desarrollar estudios geológicos, tectónicos e hidrogeológicos de trece (13) lotes identificados para el proyecto "Evaluación del potencial de desarrollo de proyectos de inyección geológica de CO2 en el Perú mediante opciones reales", la cual fue solicitada mediante carta S/N recibida el 19.10.2018 y que será entregada a la firma de la presente Carta de Transferencia.

Queda entendido que la información recibida por la Dra. Sandra Santa Cruz Hidalgo, será utilizada únicamente para realizar estudios especiales en la evaluación respectiva de las áreas de su interés y para el propósito que se menciona en el párrafo precedente.

La información contenida en el Banco de Datos de **PERUPETRO S.A.** corresponde a la información presentada por las empresas petroleras que han tenido operaciones y realizado actividades de hidrocarburos en el Perú, la cual ha sido verificada con fines de completitud y certificación antes de ser entregada a los interesados.

PERUPETRO S.A. es la única fuente autorizada para entregar información técnica de las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos en el Perú.

Toda la información materia de la presente Carta de Transferencia tiene carácter confidencial y, en consecuencia, no podrá ser suministrada o transferida a terceros, sean éstos personas naturales o jurídicas.

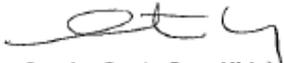
La **PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ** se compromete en entregar a **PERUPETRO S.A.**, sin costo, copia de los estudios que finalmente edite la Dra. Sandra Santa Cruz Hidalgo, así como copia de todos los estudios, análisis, cálculos, etc., realizados con la información entregada.

Sírvanse suscribir la presente carta de transferencia en dos originales y devolverlas en señal de conformidad dentro de los 15 días siguientes a su fecha de emisión. Posteriormente, **PERUPETRO S.A.** le remitirá un ejemplar debidamente suscrito.

CONTRATO N° 159-2017 - FONDECYI

**Decy Mogollón Curay
Gerente General (e)
PERUPETRO S.A.**




**Sandra Santa Cruz Hidalgo
Docente Investigadora
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**SANDRA CECILIA SANTA CRUZ HIDALGO
COORDINADORA GENERAL DEL PROYECTO**

Av. Luis Aldana 320 – San Borja Lima 41 – Perú
T: (511) 206 1800 F: (511) 206 1801
www.perupetro.com.pe

GGRL-TERI-GFBD-067-2018

ANEXO I

RELACIÓN DE INFORMACIÓN ENTREGADA A LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

1. Información Técnica:

Nº	Lotes	Código	Total Archivos	Peso (bytes)
1	Lote 126	ITP	4	81,488,888
2	Lote 192	ITP/GE	34	1,305,054,915
3	Lote 31 E	ITP	4	45,419,871
4	Lote 8	ITP	29	306,311,499
5	Lote I	ITP/IPP	4	45,978,654
6	Lote II	ITP	2	1,095,851
7	Lote IX	ITP	8	773,030,768
8	Lote VII VI	ITP	3	27,912,287
9	Lote X	ITP	2	5,835,143
10	Lote XIII	ITP	5	95,246,104
11	Lote XV	ITP	1	987,509
12	Lote XXI	ITP/IPP	1	22,557,016
13	Reportes Regionales	ITP	16	1,850,575,548
TOTAL			113	4,561,494,051

CONTRATO N° 159-2011-PP-UNUCO-11

SANDRA CECILIA SANTA CRUZ HIDALGO
COORDINADORA GENERAL DEL PROYECTO

COMENTARIOS

- La información se entrega en 02 CD's a la PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.
- Es toda la información que se encuentra disponible en el Banco de Datos en relación a lo requerido por la compañía PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ.





GERENCIA DE EXPLORACION

Nº: TERI-CARGO- 66/2018

FECHA DE ENTREGA
03/12/2018

COMPANIA
Pontificia Universidad Católica Santa María

PERSONA A QUIEN SE AUTORIZA:
Victor Cevallo Cano

SOLICITADO MEDIANTE CARTA:
CARTA S/N

DE FECHA:
19/10/2018

CARTA CONVENIO Nro :
GGRL-TERI-GFBD-067-2018

TOTAL PARCIAL

POR MEDIO DE LA PRESENTE SE HACE ENTREGA DE LA SIGUIENTE INFORMACIÓN TÉCNICA:

Nro CODIGO	DESCRIPCION
DOS (02) CD'S	INFORMACIÓN TÉCNICA CUYA RELACIÓN SE ADJUNTA
<i>[Handwritten diagonal line across the table]</i>	

RECEBIDO POR:
 VIGILANCIA
 03 DIC 2018
[Signature]
S A L I D A

TRANSFERENCIA POR SER DE SU PROPIEDAD
 PRESTAMO REALIZAR UN TRABAJO
 DEVOLUCION OTROS

OTROS (EXPLICAR):

REVISADO POR:

Firma:

Nombre: Malena Valdivia

AUTORIZADO POR:

Firma:

Nombre: Ivanoff Ibarra

RECIBIDO POR:

Firma:

Nombre:

Figura 37: mapa con acuerdos de los expertos para la evaluación de las zonas potenciales de almacenamiento de CO₂.

Dimensión	Criterio	Variable	Parámetro	Acuerdo corregido	
Geológicos-estructurales	Tectónica y estructura	Propiedades geomecánicas y geodinámicas	Presiones laterales de la cuenca sedimentaria	0.57	
			Presiones geodinámicas	0.57	
		Fracturas y Fallas	Dirección y buzamiento de fracturas y fallas	0.66	
			Velocidad de movimiento relativo	0.53	
	Geología	Formación almacén	Porosidad	0.66	
			Permeabilidad	0.70	
			Tipo de litología	0.70	
			Espesor de la formación	0.66	
			Profundidad	0.66	
			Capacidad de almacenamiento	0.66	
		Formación sello	Plasticidad	0.66	
			Porosidad	0.61	
			Permeabilidad	0.70	
			Tipo de litología	0.61	
			Espesor de la formación	0.70	
			Presión estructural	0.66	
		Hidrogeología y fluidos en el medio poroso	Densidad del fluido	0.61	
			Solubilidad de CO ₂	0.66	
		Datos Históricos de estructuras existentes (yacimientos de hidrocarburos de carbón, acuíferos salinos, etc)	Fugas previas de hidrocarburos en los pozos exploratorios	0.70	
			Fugas previas de hidrocarburos en fracturas o fallas	0.70	
	Disponibilidad de datos existentes de pozos, datos sísmicos, datos satelitales, etc		0.70		
	Ambientales	Componente Físico	Fuentes de agua	Cercanía a fuentes de agua dulce	0.53
				Cercanía a fuentes de aguas subterráneas	0.70
Componente biológico		Peligros Naturales	Biodiversidad	Peligro sísmico	0.61
				Cercanía a zonas protegidas	0.61
				Cercanía a ecosistemas frágiles	0.61
Sociales	Componente poblacional	Ocupación del territorio	Cercanía a hábitats de especies endémicas y vulnerables	0.61	
			Cercanía a núcleos sensibles poblacionales	0.66	
		Conflictos	Cercanía a poblaciones vulnerables	0.66	
			Por la actividades mineras informales	0.61	
Económicos	Facilidades logísticas	Accesibilidad	Compatibilidad con usos de suelos actuales	0.57	
			Percepción	0.48	
			Aceptación	0.48	
		Servicios de Comunicación	Vías (Autopistas, Carreteras o trochas)	0.61	
			Aeropuertos	0.53	
			Puertos	0.57	
			Telefonía	0.61	
			Internet	0.53	
			Radio	0.57	
	Condiciones de salubridad	Propagación	Clima	0.57	
		Condiciones técnicas	Alocación	Topografía	0.61
	Área disponible			0.66	
	Existencia servicios básicos			0.53	
Infraestructura existente y posiblemente afectada	0.70				