



Vigilada Mineducación

ESTUDIO DE VIABILIDAD TÉCNICA Y FINANCIERA PARA IMPLEMENTACIÓN
DE TUBERÍA FLEXIBLE EN LA CONSTRUCCIÓN DE LÍNEAS DE FLUJO EN LA
INDUSTRIA DE HIDROCARBUROS EN EL DEPARTAMENTO DE ARAUCA,
COLOMBIA

*Technique and financial viability study for flexible pipe implementation on the
flowlines construction on the hydrocarbon industry in the department of Arauca,
Colombia*

DANIELA SÁNCHEZ MONCADA

Trabajo de grado

Asesor: Elkin Arcesio Gómez Salazar PhD

UNIVERSIDAD EAFIT

ESCUELA DE ADMINISTRACIÓN

MAESTRÍA EN GERENCIA DE PROYECTOS

BOGOTÁ

2023

RESUMEN

El alcance del presente trabajo es encontrar una solución para una compañía de hidrocarburos ubicada en el municipio de Tame, Arauca, que le permita construir líneas de flujo para el transporte de fluidos en menos tiempo de ejecución. De esta manera, la compañía podría contar con mayor flexibilidad de invertir en proyectos y mejorar la rentabilidad anticipando flujos de ingresos, dada la variabilidad de la programación para la perforación de pozos. Además, teniendo en cuenta que la inversión en perforación de pozos puede representar un alto porcentaje del total de las inversiones de la compañía en el sector de hidrocarburos, sería beneficioso considerar una estrategia que permita cumplir con los plazos desde la perforación y estar preparados para poner en funcionamiento el pozo. Con el fin de cumplir el alcance, en el marco teórico se consolidaron las herramientas que permitieron realizar la evaluación y se describieron las tecnologías a evaluar. En el diseño metodológico se construyó el modelo de evaluación considerando asuntos cuantitativos, debido al tipo de información técnica disponible para evaluación. mediante las fuentes de la información recolectadas se completó el estudio financiero y técnico comparando el método tradicional de construcción de línea de flujo soldada versus la construcción en línea de flujo flexible.

Palabras clave: transporte de hidrocarburos, innovación, rentabilidad, tubería, inversión.

ABSTRACT

The scope of this work is to find a solution for an oil & gas company located in the municipality of Tame, Arauca, that allows it to construct flowlines for fluid transportation in a shorter execution time. In this way, the company could have greater flexibility to invest in projects and improve profitability by anticipating income flows, given the variability in the scheduling of well drilling. Additionally, considering that the investment in well drilling can represent a high percentage of the total company investments in the oil & gas sector, it would be beneficial to consider a strategy that enables meeting deadlines from drilling and being prepared to operationalize the well.

In order to fulfill the scope, in the theoretical framework was consolidated the tools that allowed for the evaluation and were described the technologies to be assessed. In the methodological design, the evaluation model was constructed considering quantitative aspects, due to the type of technical information available for assessment. Through the collected sources of information, the financial and technical study was completed by comparing the traditional method of welded flowline construction versus flexible flowline construction.

Keywords: transportation of hydrocarbons, innovation, profitability, pipelines, investment

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	9
2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. OBJETIVOS.....	16
4.1. OBJETIVO GENERAL.....	16
4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
5. MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL.....	17
5.1. FASES DE DESARROLLO DE UN PROYECTO DE INVERSIÓN	21
5.1.1. Preinversión.....	21
5.1.2. Fase de inversión o ejecución	22
5.1.3. Fase operacional	22
5.2. TUBERÍAS FLEXIBLES Y TUBERÍAS DE ACERO AL CARBÓN	26
5.2.1. Tubería en acero al carbón.....	27
5.2.2. Tubería flexible	27
6. DISEÑO METODOLÓGICO	30
6.1. ENFOQUE CUANTITATIVO	30
6.2. ESTUDIOS DESARROLLADOS	32
6.2.1. Estudio del entorno	32
6.2.2. Estudio técnico.....	33
6.2.3. Estudio financiero.....	34
7. DESARROLLO DEL TRABAJO.....	35
7.1. ESTUDIO DE ENTORNO SOCIOECONÓMICO.....	35

7.2. ESTUDIO TÉCNICO	48
7.2.1. Oleoductos o gasoductos en acero al carbono	49
7.2.2. Oleoductos o gasoductos en tubería flexible	52
7.3. NORMATIVIDAD AMBIENTAL Y LEGAL.....	62
7.3.1. Normatividad ambiental	62
7.3.2. Normatividad aplicada en fabricación	65
7.3.3. Normas de diseño y fabricación de tubería de acero flexible	66
7.3.4. Códigos y regulaciones nacionales	69
7.4 ESTUDIO FINANCIERO.....	72
7.4.1 Análisis detallado de costos	79
7.4.2 Evaluación comparativa de alternativas	82
7.4.3 Análisis de sensibilidad a variables tiempo y flujo transportado	87
7.4.4 Análisis de tornado	95
8. CONCLUSIONES	104
9. RECOMENDACIÓN	107
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	108
ANEXOS	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Personal requerido utilizando tubería soldada.....	60
Tabla 2 Personal requerido utilizando tubería flexible	61
Tabla 3 Presupuesto para sistema de construcción convencional en tubería soldada	81
Tabla 4 Presupuesto para sistema de construcción en tubería flexible	82
Tabla 5 Comparativo por categoría	83
Tabla 6 Comparativo en precio variando longitud	85
Tabla 7 Ruta crítica de construcción con tubería soldada y tubería flexible	86
Tabla 8 Flujo de ejecución de costos tubería soldada (MMCOP).....	88
Tabla 9 Flujo de ejecución de costos tubería flexible (MMCOP)	89
Tabla 10 Análisis de valor presente neto (VPN).....	91
Tabla 11 Análisis de sensibilidad.....	93
Tabla 12 Análisis de sensibilidad. Caso TRM 3900.....	94
Tabla 13 Análisis de sensibilidad. Caso TRM 4500.....	94
Tabla 14 Análisis de sensibilidad. Caso TRM 4900.....	94
Tabla 15 Distribución normal de probabilidad para precios del crudo	96
Tabla 16 Distribución normal de probabilidad para TRM.....	96
Tabla 17 Variables de entrada para gráfico tipo araña y diagrama de tornado	97
Tabla 18 Datos de variación porcentual de variables independientes caso 1. VPN alternativa actual soldada	99
Tabla 19 Datos de variación porcentual de variables independientes. Caso 1. Alternativa actual soldada.....	100
Tabla 20 Datos de variación porcentual de variables independientes. Caso 2. Alternativa flexible.....	101
Tabla 21 Datos de variación porcentual de variables independientes. Caso 2. Alternativa flexible.....	102

LISTA DE IMÁGENES

Imagen 1 Tubería flexible	28
Imagen 2 Inflación y meta de inflación	37
Imagen 3 Flujo trimestral de inversión extranjera directa en Colombia, durante el período diciembre 2007-2022	38
Imagen 4 Distribución del porcentaje de la IED en Colombia por sectores.....	38
Imagen 5 Tasa de crecimiento anual de Colombia, enero 2021p-marzo 2023pr ..	40
Imagen 6 Tasa de desempleo 32 ciudades y áreas metropolitanas. Abril 2022 a marzo 2023.....	41
Imagen 7 Proyecciones de crecimiento económico para Colombia en 2023	42
Imagen 8 Incidencia de pobreza multidimensional.....	43
Imagen 9 Cantidad de empresas registradas.....	45
Imagen 10 Porcentaje de personas en condición pobreza multidimensional	46
Imagen 11 HDPE – US\$ Price Index.....	54
Imagen 12 Pipeline construction cost – estimated	74
Imagen 13 Pipeline construction cost components	74
Imagen 14 Global Steel Price index	76

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1 Costos construcción oleoductos y gasoductos	75
Gráfica 2 Índices de costos históricos.....	79
Gráfica 3 Comparativo por categoría	83
Gráfica 4 Costos fijos versus costos variables según tecnología utilizada	84
Gráfica 5 Variabilidad del presupuesto con tubería flexible versus soldada, según longitud	85
Gráfica 6 Gráfico tipo araña. Alternativa actual soldada	99
Gráfica 7 Diagrama de tornado. Alternativa actual soldada	100
Gráfica 8 Gráfico tipo araña. Alternativa flexible	101
Gráfica 9 Diagrama de tornado. Alternativa flexible	102

1. INTRODUCCIÓN

Desde el inicio de la explotación y uso de hidrocarburos como combustibles, surgió la necesidad de transportarlos a plantas para su tratamiento, refinamiento, almacenamiento, distribución y centros de consumo. Conforme aumentaba la demanda y producción de los campos, surgió la necesidad de construir líneas de flujo utilizando tubería en acero al carbón como alternativa para transportar los hidrocarburos desde los yacimientos hasta las plantas de tratamiento y almacenamiento. A nivel mundial, las compañías de hidrocarburos buscan optimizar recursos y tiempo para lograr una mayor producción, centrándose siempre en la calidad del diseño, seguridad de las personas y el cumplimiento de las normas regionales y acuerdos internacionales. Estas compañías experimentan cambios a través de la innovación y la transformación en entornos geológicos complejos y zonas socioambientalmente sensibles.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Las actividades de exploración en la cadena de valor de la industria de hidrocarburos (en inglés *oil & gas*) representan uno de los mayores desafíos para evaluar las reservas del país, probar nuevos descubrimientos y asegurar la sostenibilidad del negocio. En Colombia, las cifras más recientes emitidas en 2022 por la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH) sobre la estimación de reservas de petróleo y gas arrojan un tiempo de autosuficiencia entre 7 y 8 años (Acosta, 2022). Según la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP, 2021), en los últimos ocho años se ha producido una reducción de más del 81% en la inversión en exploración, al pasar de US\$1910 millones invertidos en 2014 a US\$780 millones en 2019 y US\$350 millones en 2020. Esto constituye un desafío para los sectores público y privado, ya que deben maximizar las campañas exploratorias en los próximos años para aumentar las reservas que puedan ser producidas, tratadas, evacuadas y comercializadas.

La ACP (2021) ha destacado en su informe económico de nuevos proyectos de gas la importancia de buscar soluciones a los problemas denominados contingencias o cuellos de botella, para que los nuevos proyectos en desarrollo puedan obtener la certificación de reservas probadas. Una de las cuatro principales contingencias identificadas es “Falta de infraestructura de transporte”, lo cual refuerza la necesidad de identificar y evaluar nuevas tecnologías y métodos constructivos que faciliten el desarrollo de proyectos de infraestructura de transporte de hidrocarburos.

En esta fase exploratoria se involucran diversos procesos y equipos de trabajo, entre los cuales se encuentran los equipos de gestión de proyectos de infraestructura, que deben garantizar que se cuente, de forma segura y oportuna, con instalaciones o facilidades para el tratamiento de fluidos de producción y transporte, en caso de que los pozos perforados no estén ubicados en la misma plataforma o zona aledaña. Para lograr esto, partimos de tomar como línea base de evaluación la forma tradicional en la que se desarrollan los proyectos de transporte de hidrocarburos en tuberías, denominados oleoductos y(o) gasoductos (Superintendencia de Industria y Comercio, s. f.). Este tipo de infraestructura se empezó a utilizar en Colombia en 1926, cuando fue necesario transportar hidrocarburos de manera más segura y práctica que con los métodos anteriormente utilizados, tales como el transporte en camiones o fluvial (Portafolio, 2018).

En Colombia, el desarrollo de proyectos de infraestructura implica desafíos no solo técnicos y económicos, sino también aspectos relacionados con la gestión del entorno social y ambiental, que cada día es más importante como parte integral de la ejecución del proyecto. En esta gestión del entorno, es necesario informar y comunicar el alcance, el tiempo y el impacto que tendrá el proyecto en cada una de sus etapas a todos los grupos de interés.

Estos procesos informativos y de vinculación de mano de obra local le han añadido tiempo al desarrollo integral del proyecto y, debido a que no se pueden excluir, se han requerido medidas técnicas que permitan mantener los intereses del negocio

en los plazos previstos. Es fundamental que los procesos de evaluación de proyectos contemplen estrategias, recursos y acciones para implementar buenas prácticas sociales, incluso siguiendo modelos como lo establecido en la guía técnica colombiana GTC 250 (Icontec Internacional, 2014).

En la industria de hidrocarburos, es primordial y decisivo el tiempo entre la identificación de un prospecto o posible pozo a perforar y el momento en que se obtiene el primer barril producido. Esto se debe a que el potencial de producción esperado y las reservas asociadas se pueden estimar una vez que se prueba el pozo, lo que afecta el valor de la compañía petrolera en el mercado.

En la operación de extracción de hidrocarburos, se utilizan líneas de flujo como medio de transporte de los fluidos, desde los pozos perforados hasta las plantas de tratamiento, almacenamiento o distribución. Actualmente, los métodos constructivos convencionales para la construcción de líneas de flujo emplean tubería de acero al carbón y uniones soldadas. Estas tuberías están expuestas a diversos agentes externos, tales como desgaste, roturas, corrosión, daños y fisuras ocasionados por el medio ambiente; además, en su interior pueden sufrir daños debido a las propiedades fisicoquímicas del fluido que se transporta. A ello se suman los daños causados por terceros externos durante la operación y el que los métodos constructivos para estas tuberías convencionales pueden llevar más tiempo en su construcción.

Los anteriores factores pueden ocasionar problemas ambientales, económicos y sociales para las compañías de petróleo y gas; adicional, este enfoque genera una optimización limitada en términos de tiempo y costos debido a su proceso de instalación. Debido al corto período transcurrido entre el inicio de perforación del pozo y la producción del primer barril, es necesario evaluar nuevos métodos constructivos y(o) materiales que permitan reducir la brecha de tiempo y evitar retrasos en la construcción de las líneas de flujo necesarias para el transporte de los barriles producidos.

El transporte de hidrocarburos a través de tuberías convencionales de acero al carbón se lleva a cabo de manera continua en el municipio de Tame (Arauca), lo que implica altos costos de instalación, tiempos de ejecución prolongados y pérdidas económicas en caso de fugas, taponamientos, deterioro o daños. La evaluación de aspectos tales como eficiencia operativa, costos y retorno de inversión, seguridad y medio ambiente, así como de factores externos, permitirá tomar una decisión fundamentada en cuanto a la adopción de nuevas tecnologías y sus posibles beneficios para la compañía.

Con el fin de optimizar tiempo y reducir la brecha de no tener cómo fluir los pozos, una compañía del sector oil & gas ubicada en Tame está interesada en explorar opciones de inversión en nuevas tecnologías que mejoren el tiempo de ejecución de sus proyectos; sin embargo, debido a las condiciones políticas y socioeconómicas del departamento de Arauca, y en particular las de Tame, el

desarrollo de proyectos de infraestructura se enfrenta a entornos más complejos, en términos de acceso a bienes y servicios y a contratación de mano de obra, así como a desafíos adicionales en tiempo, logística y seguridad. Estos desafíos se suman al aumento de precios en servicios y materiales debido a las limitaciones de las vías de acceso nacionales que faciliten la oferta en la zona.

Por lo tanto, se requiere evaluar la implementación de tuberías flexibles que mejoren los tiempos de ejecución, reduzcan los costos de instalación, permitan reparaciones ágiles y presenten mejoras en su composición química para prevenir la corrosión.

3. JUSTIFICACIÓN

La compañía objeto de la presente investigación, operadora del sector *oil & gas* en Tame, se dedica al desarrollo de proyectos de exploración, perforación, construcción de facilidades y operación, producción, transporte, distribución y comercialización de hidrocarburos. Con el objetivo de aprovechar las oportunidades de perforación de yacimientos y con el fin de mejorar el desarrollo de la compañía, se pretende construir líneas de flujo que permitan el transporte de hidrocarburos hacia las plataformas de tratamiento y almacenamiento. Dada la necesidad de ejecutar estos proyectos en un tiempo reducido, es necesario evaluar la opción de utilizar tubería flexible para optimizar el tiempo de construcción.

En este sentido, la evaluación de la tubería flexible, analizando y destacando sus beneficios, podría ayudar al área de la organización responsable de la ejecución de los proyectos, a tomar decisiones que permitan reducir los gastos operativos y la mano de obra necesaria para cumplir con los plazos de ejecución establecidos.

El presente trabajo está dirigido a una compañía petrolera situada en Tame, buscando desarrollar un estudio de prefactibilidad utilizando el método Onudi (Behrens y Hawranek, 1994). El propósito es determinar si para la compañía es factible y beneficioso invertir en proyectos de construcción de líneas de flujo utilizando nuevas tecnologías de tubería flexible.

4. OBJETIVOS

4.1. OBJETIVO GENERAL

Evaluar qué viabilidad tendría una inversión en tecnologías de innovación que utilice tubería flexible en proyectos de construcción de líneas de flujo para transportar hidrocarburos en un campo petrolero de una compañía ubicada en Tame, con base en el estudio técnico y financiero.

4.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desarrollar un estudio de entorno socioeconómico, para determinar los factores que impactan en la implementación de una nueva tecnología con tubería flexible.
- Hacer un análisis comparativo de aspectos técnicos, que permita validar el cambio de tecnología.
- Definir los requerimientos normativos ambientales en la construcción de líneas de flujo y normas legales que apliquen para la fabricación de la tubería flexible.
- Realizar un estudio financiero que permita evaluar el costo de oportunidad para la construcción de líneas de flujo con tubería flexible frente al uso de métodos convencionales.

5. MARCO TEÓRICO O MARCO CONCEPTUAL

Partiendo del objeto estudio de investigación del presente trabajo, a continuación, se exponen conceptos relacionados con la formulación de proyectos, enfocándose en la viabilidad de hacer cambios de tecnología en la construcción de líneas de flujo en una empresa de hidrocarburos.

A lo largo de los siglos, se han desarrollado grandes proyectos tales como las pirámides de Egipto, los acueductos romanos, el ferrocarril Transiberiano, el Empire State y el canal de Panamá; sin embargo, solo fue en la década de 1950 cuando la gestión de proyectos comenzó un proceso hacia su formalización, con los diagramas del estadounidense Henry Laurence Gant. El siguiente momento importante fue en 1956, con la creación de la Asociación Americana de Ingenieros de Costos (AACE), en Estados Unidos. Los métodos formales de gestión de proyectos aparecen por primera vez con la técnica de revisión y evaluación de programas (PERT, por sus siglas en inglés *Program Evaluation and Review Technique*), desarrollada por la marina de Estados Unidos, y con el método de ruta crítica (CPM, por sus siglas en inglés *Critical Path Method*), desarrollado por DuPont y Remington Rand. Finalmente, en 1969, cinco voluntarios crean el Instituto para la Administración de Proyectos (PMI, por sus siglas en inglés *Project Management Institute*), dedicado inicialmente al campo de la ingeniería, con el fin de formular estándares profesionales en la gestión de proyectos (Moreno y otros, 2016).

De acuerdo con Sapag y otros (2013):

Un proyecto no es más ni menos que la búsqueda de una solución inteligente al planteamiento de un problema tendiente a resolver. Cualquiera sea la idea que se pretende implementar, cualquiera la inversión, cualquiera la metodología o la tecnología por aplicar, ella conlleva necesariamente la búsqueda de proposiciones coherentes destinadas a resolver las necesidades de la persona humana en todos sus alcances: alimentación, salud, educación, vivienda, religión, cultura, política, etcétera. (p. 4)

Tal como lo expresa Miranda (2001), en el ciclo del proyecto está el estudio de prefactibilidad, donde se tratan aspectos generales del entorno socioeconómico y el análisis de mercado, se identifican las principales variables que afectan su comportamiento, se definen en principio alternativas de tamaño y localización, se selecciona un modelo técnico adecuado, se diseña una organización para las etapas de instalación y operación, se determinan las inversiones, costos y utilidades y, finalmente, se aplican criterios de rentabilidad financiera, económica, social y ambiental:

Al terminar el estudio de prefactibilidad se espera, entonces, o mejorar el nivel de información para tomar una decisión más ponderada y pasar al estudio de factibilidad, o proceder al diseño definitivo para ejecutarlo, o abandonar el proyecto de manera temporal o definitiva al no presentar ventajas comparativas que ameriten su ejecución. Cabe anotar que el estudio de prefactibilidad conduce a seleccionar o escoger una única

alternativa que será estudiada si se considera necesario, con mayor rigor en el nivel de factibilidad. (p. 35)

Para el desarrollo de proyectos, se debe tener claro un enfoque del objetivo y de cómo este se logrará. Existen varias metodologías que permiten optimizar la probabilidad de éxito con la estandarización de actividades y lograr un equilibrio entre costo, tiempo y alcance mediante la gestión de proyectos. Una metodología de gestión de proyectos es un sistema de paso a paso basado en técnicas y procedimientos usados por personas que trabajan en una misma área. (Miranda, 2021)

Las metodologías más reconocidas que se utilizan para la gestión de proyectos son las que se exponen a continuación:

- Project Management Institute (PMI): es una institución fundada en 1969, en Estados Unidos, que agrupa a profesionales de la dirección de proyectos. Su metodología, contenida en la *Guía del PMBOK*, fue construida siguiendo el método tradicional, que busca controlar los proyectos en seis fases (PMI, 2021).
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (Onudi, s. f.): organismo especializado en promover el desarrollo industrial en los países en desarrollo y en economías en transición.

- Banco Mundial: organización internacional enfocada en finanzas, que establece directrices para los proyectos financiados por el Banco Mundial (s. f.).
- Banco Interamericano de Desarrollo (BID): emplea dos metodologías para preparación de proyectos: *Project Preparation Facility* (PPF) y *Project Preparation and Execution Facility* (PROPEF) (IADB, s. f.).
- Marco lógico: metodología utilizada para la conceptualización, diseño, ejecución, seguimiento y evaluación de proyectos (Méndez, 2006).
- ZOPP (*Zielorientierte Projectplanung*): Metodología alemana para la planeación de proyectos orientada a objetivos (Helming y Göbel, 1998).

Para el presente trabajo se emplea la metodología Onudi, contenida en el *Manual para la preparación de estudios de viabilidad industrial* (Behrens y Hawranek, 1994), reconocida a nivel internacional, avalada y confiable, que permite evaluar el proyecto de forma organizada, y en la que se incluyen estudios de entorno, mercado, técnico, ambiental, organizacional, legal y financiero, que hacen que se reduzca la incertidumbre y se determinen aspectos que puedan afectar, negativa o positivamente, el proyecto. El enfoque del presente trabajo son el estudio técnico y el financiero a partir de esta metodología.

La finalidad de la metodología Onudi es proporcionar a los países en desarrollo un instrumento para mejorar la calidad de los proyectos de inversión y contribuir a la normalización de los estudios de viabilidad industrial. La situación de los países latinoamericanos, ante la escasez de recursos y las limitaciones para obtenerlos, obliga a que se implemente esta metodología con una orientación estratégica, que cumpla con un análisis financiero y económico integrados (Behrens y Hawranek, 1994).

El desarrollo de un proyecto de inversión se compone de tres fases: preinversión, inversión y operación, las cuales, a su vez, se dividen en etapas que involucran actividades de consultoría, ingeniería e industrial (Behrens y Hawranek, 1994), y que se describen a continuación.

5.1. FASES DE DESARROLLO DE UN PROYECTO DE INVERSIÓN

5.1.1. Preinversión

Comprende el desarrollo de una serie de estudios que llevan a definir la viabilidad del proyecto. Esta fase se determina si es factible o no llevar a cabo el proyecto y, en caso afirmativo, establecer cómo se desarrollará este para cumplir con los objetivos (Lledó, 2009).

5.1.2. Fase de inversión o ejecución

Abarca el montaje físico y demás actividades necesarias para poner en marcha el proyecto (Miranda, 2021).

5.1.3. Fase operacional

Comienza una vez el proyecto se ha puesto en marcha y se inician las operaciones, generando los beneficios previstos inicialmente (Lledó, 2009).

Tal como lo indica Arboleda (2013): “Para que un negocio o empresa tenga éxito, el primer paso es buscarle un bien o servicio con gran potencial de rentabilidad. La clave del éxito está en entrar al negocio preciso en el momento preciso” (p. 29).

El manejo óptimo de los recursos y la búsqueda de generación de riqueza hacen que este estudio de viabilidad técnica y financiera identifique una oportunidad de negocio basada en los estudios propuestos en el manual de Onudi (Behrens y Hawranek, 1994). Además, permite determinar si se debe seguir a la siguiente fase del proyecto dentro del ciclo de preinversión y(o) recomendar ajustes para su viabilidad.

Según ONUDI, hay tres niveles de estudios en la fase de preinversión:

- Estudio de oportunidades

- Estudios de previabilidad
- Estudios de viabilidad

Desarrollar previamente estos estudios evitará pasar directamente de la idea del proyecto al estudio final de viabilidad, y así se podrá abordar detalladamente la idea del proyecto sin omitir posibles soluciones identificadas (Miranda, 2021).

El presente trabajo se centra en la etapa de preinversión, donde es necesario recopilar información histórica que permita analizar cada proyecto y tomar decisiones; sin embargo, esto no garantiza el éxito, ya que existen variables que no se pueden controlar.

De acuerdo con Baca (1995):

El realizar un análisis lo más completo posible, no implica que, al invertir, el dinero estará exento de riesgo. El futuro siempre es incierto y por esta razón el dinero siempre se arriesgará. El hecho de calcular unas ganancias futuras, a pesar de realizar un análisis profundo, no garantiza que esas utilidades se ganen, tal como se calculó. En los cálculos no están incluidos los factores fortuitos como huelgas, incendios, derrumbes, etc.; simplemente porque no son predecibles y no es posible asegurar que una empresa de nueva creación o cualquier otra, estará a salvo de factores fortuitos. Estos factores también provienen del ámbito económico o político, como es el caso de las drásticas

devaluaciones monetarias, la atonía económica, los golpes de Estado u otros acontecimientos que afectan gravemente la rentabilidad y la estabilidad de la empresa. Por estas razones, la toma de la decisión acerca de invertir en determinado proyecto siempre debe recaer en grupos multidisciplinarios que cuenten con la mayor cantidad de información posible, no en una sola persona ni en el análisis de datos parciales. A toda actividad encaminada a tomar una decisión de inversión sobre un proyecto se le llama evaluación de proyectos. (p. 3)

Utilizando la metodología Onudi (1978; 1982) para la formulación de proyectos, se busca cumplir el objetivo del presente trabajo de grado para obtener el título de magister en gerencia de proyectos, el cual incluye estudios de viabilidad técnica y análisis financiero para la toma de decisiones sobre la inversión.

Según Bernal (2010), los métodos del proceso de investigación científica relevantes son los siguientes:

Método cuantitativo o método tradicional: Se fundamenta en la medición de las características de los fenómenos sociales, lo cual supone derivar de un marco conceptual pertinente al problema analizado, una serie de postulados que expresen relaciones entre las variables estudiadas de forma deductiva. Este método tiende a generalizar y normalizar resultados. (p. 60)

Método cualitativo o método no tradicional: De acuerdo con Bonilla y Rodríguez (2000), se orienta a profundizar casos específicos y no a

generalizar. Su preocupación no es prioritariamente medir, sino cualificar y describir el fenómeno social a partir de rasgos determinantes, según sean percibidos por los elementos mismos que están dentro de la situación estudiada. (p. 60)

Es importante mencionar que el método que se va a utilizar en una investigación por realizar depende del objeto de estudio, del problema planteado y de las hipótesis por probar (si las hay) (p. 61)

En el contexto de la economía mundial, la globalización ha convertido al mundo en un mercado de insumos, lo que crea un espacio para cubrir todo el proceso de la cadena de consumo, que abarca desde la producción, adquisición y distribución hasta la comercialización. Los hidrocarburos, tema abordado en el presente trabajo, desempeñan un papel importante en la economía del país, y cada empresa del sector de hidrocarburos enfatiza en la optimización de recursos, la mejora de los tiempos y el ahorro de costos, desde la extracción hasta el transporte y la disposición final, lo que refleja la oportunidad y la competencia entre las compañías (Ocampo J. A., 2002).

A medida que se exploran y perforan pozos, se requiere un medio para transportar y aprovechar los fluidos encontrados en el subsuelo. El transporte de hidrocarburos se realiza a través de ductos, que consisten en una red de tuberías que facilitan el movimiento del fluido hasta su destino. Las diferentes líneas de flujo se designan según el producto que transportan, y son tramos de tubería que van desde los pozos

hasta su destino final, ya sea una planta de tratamiento; en el caso de la inyección, su recorrido es en sentido contrario. Se denomina oleoducto, cuando a través de este se transportan petróleo y sus derivados por largas distancias; se denomina gasoducto, cuando el producto transportado es gas; y poliductos, cuando lo transportado son productos refinados, tales como gasolina, gas licuado, diésel y otros derivados. (Riveros A., 2022)

En Tame, la compañía de petróleo y gas objeto de la presente investigación construye líneas de flujo para transportar hidrocarburos desde los pozos perforados hasta sus instalaciones de tratamiento final. Dada la programación y el corto tiempo de perforación de los pozos, está buscando optimizar el tiempo de construcción de las líneas de flujo (comunicación personal, s. f.).

5.2. TUBERÍAS FLEXIBLES Y TUBERÍAS DE ACERO AL CARBÓN

El uso de tuberías flexibles ha surgido como una alternativa innovadora con ventajas significativas en términos de instalación, mantenimiento y adaptabilidad a diferentes condiciones de terreno; sin embargo, existen varias tecnologías de tuberías para la construcción de líneas de flujo, siendo las de acero al carbón y las flexibles las que se tratan en el presente trabajo, y que se describen a continuación (FlexSteel, 2021)

5.2.1. Tubería en acero al carbón

La tubería de acero al carbón es un conducto, generalmente cilíndrico, utilizado para el transporte de fluidos. Esta tecnología convencional se emplea en la construcción de líneas de flujo, uniendo los tramos de tubería con métodos de soldadura (Permanent Steel Manufacturing, 2022).

El proceso de soldadura se realiza manualmente, uniendo los tubos mediante cordones de soldadura perimetrales. Después hecha de la soldadura, se llevan a cabo pruebas de calidad para evaluar la junta soldada. En caso de que sea rechazada, se intenta reparar en primer lugar. Si la reparación no es posible, el tramo de tubo se corta y se reemplaza para hacer una nueva unión. Este procedimiento de soldadura con electrodo revestido no puede ser automatizado, lo que implica un tiempo de trabajo mayor debido a la naturaleza manual del proceso. El soldador debe realizar la soldadura por intervalos regulares, para cambiar el electrodo y limpiar el punto de inicio antes de utilizar un electrodo nuevo (Garvery, 2006).

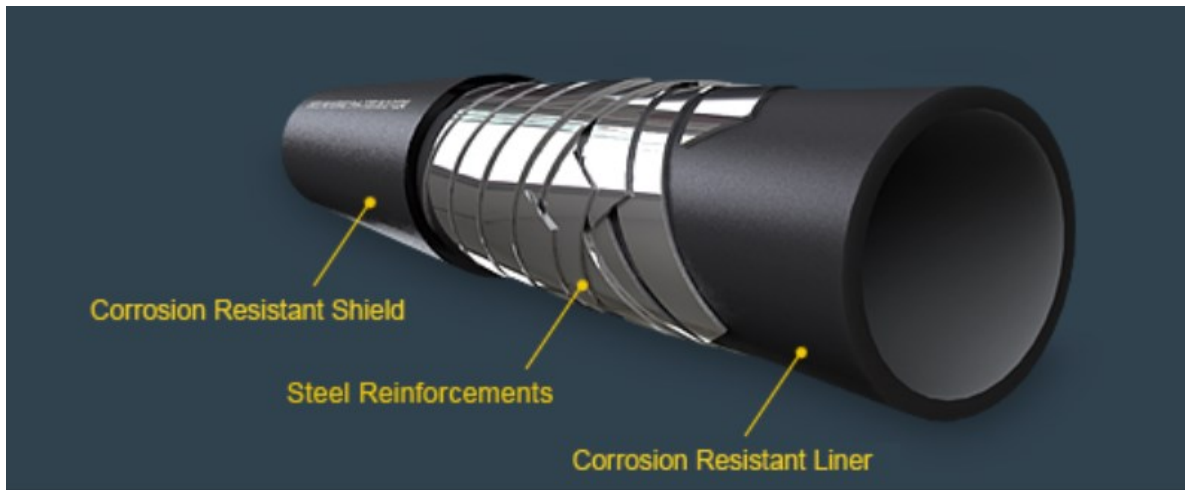
5.2.2. Tubería flexible

Un avance de la tubería de acero con varilla tradicional es la tubería de acero flexible, que combina los beneficios del acero y los polímeros termoplásticos en un solo producto enrollable. Esta tecnología ha generado numerosos beneficios y

ahorros de costos para los operadores de oleoductos en las industrias de petróleo y gas, y se utiliza especialmente para altas presiones (imagen 1) (FlexSteel, 2021).

Imagen 1

Tubería flexible



Nota. Imagen de una tubería flexible (*flexsteel pipe*) tomada de FlexSteel (2017).

La tubería flexible es enrollable y combina la resistencia a la corrosión y la facilidad de instalación con la durabilidad y el rendimiento del acero. Está reforzada con acero y cuenta con un revestimiento y un protector de polietileno de alta densidad que brindan resistencia a la corrosión. Esta tubería se une mediante conectores especiales fabricados en acero inoxidable o en materiales termoplásticos (FlexSteel, 2017).

Los accesorios de los extremos se instalan de la siguiente forma: primero, la tubería se corta a escuadra, se configura la herramienta de prensado, y el accesorio del

extremo se coloca en el extremo de la tubería. Luego, se llevan a cabo operaciones de estampación para formar las paredes de acero del accesorio de extremo, de forma permanente en la pared de la tubería. El estampado proporciona una compresión uniforme y firme en la pared de la tubería. La formación del accesorio final se realiza mediante una prensa hidráulica especializada o una unidad de estampación. El equipo de prensado incluye la propia prensa, una unidad de potencia hidráulica, un sistema de control y herramientas (FlexSteel, 2021).

Las nuevas tecnologías utilizadas en el transporte de hidrocarburos buscan abordar diversos problemas asociados a la operación. Entre los problemas propios del proyecto, se encuentran el desgaste, la corrosión y los daños externos que pueden afectar el funcionamiento adecuado de la tubería. En relación con el entorno, existe una alta probabilidad de contaminación debido al vertimiento de sustancias o fluidos en cuerpos de agua o terrenos donde se instalan las líneas de flujo (FlexSteel, 2017).

En este sentido, el presente trabajo busca evaluar la viabilidad de invertir en tecnologías de innovación que utilicen tubería flexible en la construcción de proyectos de líneas de flujo, con el fin de mitigar estos problemas y reducir los costos asociados con la reparación, el mantenimiento y la instalación de esta red de tuberías.

6. DISEÑO METODOLÓGICO

Para desarrollar la presente investigación se utilizaron diferentes fuentes de recolección y análisis de información, con el fin de cumplir el propósito fijado, permitiendo abordar la formulación de proyectos a través de los estudios de viabilidad técnica y financiera. A continuación, se describe los aspectos de la metodología utilizada para el estudio.

6.1. ENFOQUE CUANTITATIVO

El presente estudio se desarrolla bajo el enfoque de investigación cuantitativa, dado que busca comprobar la hipótesis de viabilidad, basada en datos numéricos obtenidos a partir de estudios técnicos y presupuestales de proyectos similares bajo condiciones estándares de capacidad y configuración, dejando el análisis de variables tales como distancia y tiempo, como base de futuros proyectos. De esta manera, se plantea el análisis de caso, para satisfacer una condición homogénea que permita hacer la comparación y cuantificación a partir del uso de datos.

Este tipo de investigación cuantitativa se enmarca en un modelo experimental, en el cual se busca predecir o evaluar condiciones con base en datos obtenidos de otros proyectos, adaptándolos a las condiciones del entorno local.

Con la aplicación de esta metodología, será posible plantear la relación entre dos o más variables, tales como longitud, tiempo y costo, para determinar comparaciones entre proyectos o alternativas constructivas, dejando fijas aquellas consideraciones de características similares entre casos evaluados.

Frente a las técnicas de recolección de datos, para este proceso se ha considerado el análisis de contenido de documentos, textos y experiencias, de manera que puedan integrarse con datos de experiencias previas en desarrollo de proyectos similares por parte de la compañía beneficiaria del proyecto. Lo anterior, de manera que se puedan recopilar datos históricos que permitan ajustarse a las condiciones estándar, para luego plantear proyecciones calculadas a partir de factores de ajuste tales como inflación y tasa de cambio.

Adicionalmente, como fuente de información primaria se acude a expertos en materia de proyectos de construcción, que puedan validar las condiciones técnicas requeridas para la aplicabilidad de la solución que se va a evaluar; asimismo, a fuentes de recolección secundaria, tales como libros y revistas para sustentar el análisis desarrollado.

Las técnicas de análisis empleadas para el desarrollo del trabajo, basadas en Bernal (2010), se escriben a continuación.

- **Análisis de documentos.** Análisis de material digital sobre líneas de flujo en el sector de hidrocarburos, tuberías flexibles, cambios de tecnología y variables del entorno.
- **Internet.** Fuente de información de artículos y páginas de proveedores relacionados con el objeto en cuestión.

Las fuentes de los documentos analizados y de la información utilizada en internet se referencian a continuación, en la descripción de cada estudio.

Para efectos de analizar la información obtenida y procesarla mediante la estandarización de condiciones, y así poder compararla entre tecnologías constructivas, se plantea como parte del esquema metodológico adelantar los estudios que se describen a continuación.

6.2. ESTUDIOS DESARROLLADOS

6.2.1. Estudio del entorno

Como parte del estudio de entorno, se plantean aquellas condiciones socioeconómicas de orden internacional, nacional, regional y local que pueden determinar o influir en el comportamiento del costo final o el tiempo de ejecución de procesos constructivos. Adicionalmente se describen las condiciones sociales y

laborales sobre las cuales deben ajustarse los procesos administrativos, independiente de la solución técnica a plantear.

Las fuentes utilizadas fueron:

- Banco Mundial
- Trading Economics
- DANE
- Banco de la República, Subgerencia de Política Monetaria e Información Económica
- Ministerio de Comercio, Industria y Turismo
- La República, con datos tomados de BM, FMI, BR Corficolombiana, Banco de Bogotá y Alianza Valores
- Gran Encuesta Integrada de Hogares GEIH. Fecha de publicación: 28 de abril de 2022
- Unicef

6.2.2. Estudio técnico

Se ha adelantado un estudio descriptivo, en el cual se especifican las condiciones técnicas planteadas para el método constructivo que se va a implementar, con sus principales características técnicas, constructivas y de aplicabilidad constructiva. Adicionalmente, se resaltan las guías y estándares sobre los cuales la construcción

de oleoductos valida e integra la implementación de tubería flexible como método constructivo. Adicionalmente, se consolidan la información y los datos históricos de distribución de costos de construcción de oleoductos, para efectos de determinar las variables que podrían verse beneficiadas o impactadas por el cambio de método constructivo. Las fuentes técnicas se basan en especificaciones y documentos aportados por proveedores que suministran este tipo de tuberías flexibles a nivel internacional.

6.2.3. Estudio financiero

En el estudio financiero se desarrolla un análisis de costos que toma aquellos aspectos analizados en el componente socioeconómico y técnico, para efectos de comparar, bajo condiciones similares de funcionalidad, el comportamiento de los costos y el tiempo del desarrollo de proyectos. El análisis se lleva a cabo a partir de los siguientes pasos:

1. Análisis detallado de costos.
2. Evaluación comparativa de alternativas.
3. Análisis de sensibilidad a variables tiempo y flujo transportado.
4. Análisis de tornado.

Los datos de costos se han tomado de datos de mercado obtenidos por medio de cotizaciones de servicios de empresas privadas bajo condiciones del entorno local en los Llanos Orientales.

7. DESARROLLO DEL TRABAJO

7.1. ESTUDIO DE ENTORNO SOCIOECONÓMICO

En un entorno global con perspectivas socioambientales y económicas desfavorables, que se convierten en riesgos y desafíos para el desarrollo de nuevos proyectos y negocios a nivel mundial, se debe considerar en el análisis la situación de la invasión de Rusia a Ucrania. Este evento ha desencadenado una nueva crisis energética mundial, lo que ha llevado a un aumento de hasta un 60% en los precios de acceso al uso de energía, según el Banco Mundial (2022). Esto se debe a la dependencia que la región europea ha tenido durante años por la compra de combustibles fósiles de origen ruso.

A pesar de las restricciones económicas que los países de la Unión Europea y Estados Unidos intentan imponer a Rusia para reducir sus recursos de financiación de la guerra, ese país ha aprovechado las limitaciones en el suministro a nivel internacional y se ha mantenido como uno de los principales exportadores de petróleo y gas a países como China e India. Esta situación ha generado gran incertidumbre y cambios en los precios no solo en recursos como el gas natural, sino también en el acceso a fertilizantes a nivel internacional.

Para 2023, se esperaba que los precios de la energía se redujeran en un 11% (Banco Mundial, 2022), pero se estima que seguirán siendo más altos que el

promedio de los últimos cinco años. Esto, sumado al comportamiento de los alimentos, será factor fundamental para determinar el comportamiento de la inflación, que 2023 sigue mostrando una tendencia al aumento debido a las secuelas de la pandemia, que se suman a la desaceleración del crecimiento, el aumento de tasas de interés y las reducciones en las inversiones, según indica el Banco Mundial (2023) en su informe de perspectivas económicas mundiales.

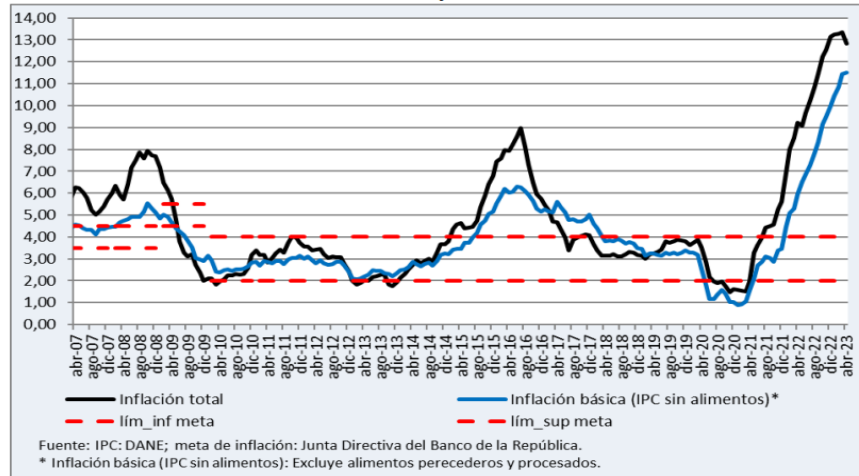
El informe de perspectivas económicas mundiales del Banco Mundial (2023a) también menciona lo siguiente:

Dada la frágil situación económica, cualquier nuevo acontecimiento adverso —como una inflación más alta que la prevista, aumentos abruptos de las tasas de interés para contenerla, el resurgimiento de la pandemia de COVID-19 o la intensificación de las tensiones geopolíticas— podría empujar a la economía mundial a la recesión. Sería la primera vez en más de 80 años que se producen dos recesiones mundiales en la misma década. (párr. 2)

Aunque la tendencia mundial muestra altas cifras de inflación, en abril de 2023 en Colombia se empiezan a observar signos de desaceleración (imagen 2). A pesar de haber mostrado una tendencia al alza y tener un promedio de inflación superior al 13% en los últimos meses, en este mes comienza a disminuir. Según el DANE, abril de 2023 cerró en un 12,82% (DANE, 2023). Según el ranking *Inflation Rate*, de Trading Economics (s. f.), esto ubica a Colombia en el puesto 41 a nivel mundial.

Imagen 2

Inflación y meta de inflación



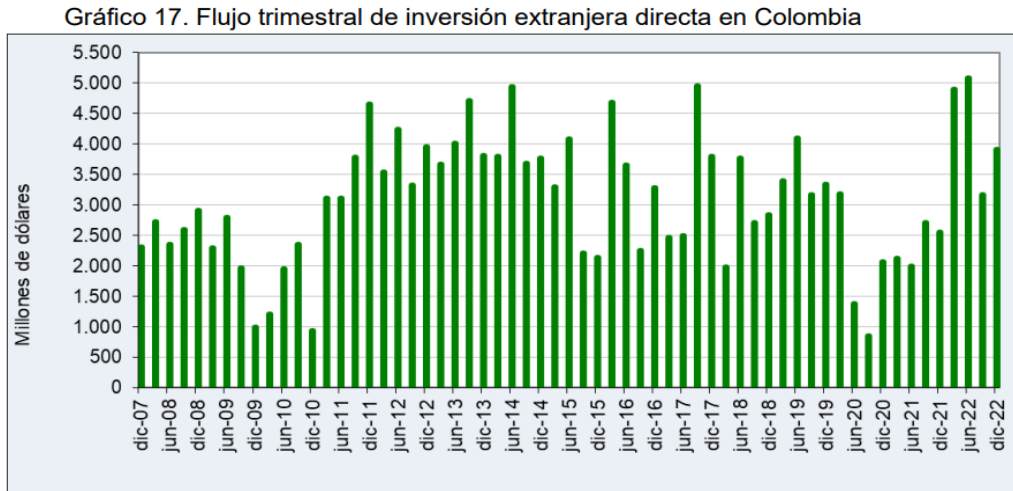
Nota. IPC: DANE; meta de inflación: Junta Directiva del Banco de la República, p. 12.

(DANE, 2023)

Los anteriores indicadores reflejan aquellas condiciones del entorno internacional que plantean desafíos y oportunidades para mantener el nivel promedio de inversión extranjera del que Colombia ha gozado en los últimos 10 años (imagen 3). La pandemia tuvo un impacto significativo en la economía, con cifras de recuperación posteriores, en donde el sector minero energético representó un 26% de la totalidad de inversión extranjera en 2022, quedando como segundo factor preponderante (imagen 4).

Imagen 3

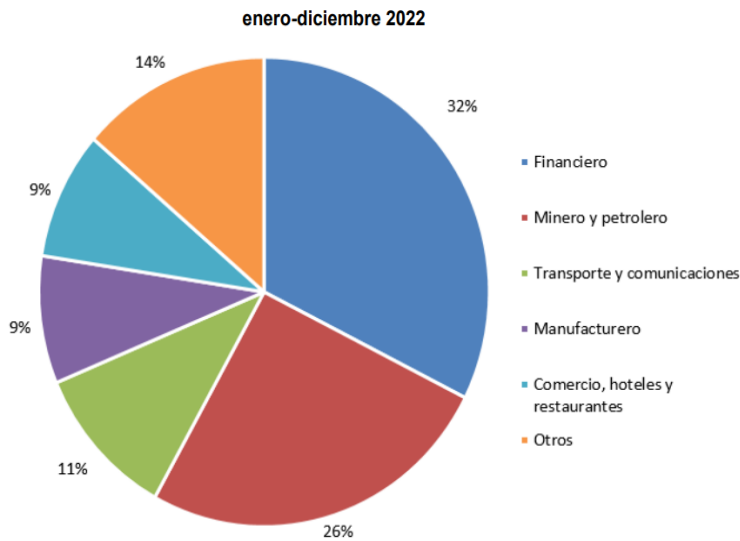
Flujo trimestral de inversión extranjera directa en Colombia, durante el período diciembre 2007-2022



Nota. Información tomada de Banco de la República (s. f., p. 22).

Imagen 4

Distribución del porcentaje de la IED en Colombia por sectores



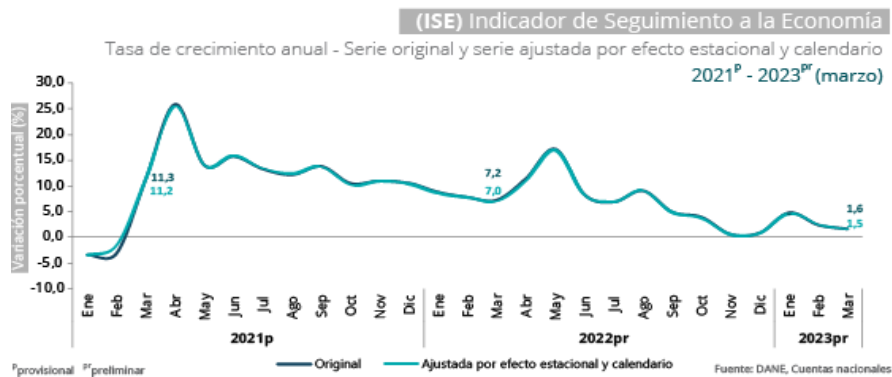
Nota. información tomada de Banco de la República (s. f., p. 22).

Como pronóstico para Colombia, y en línea con la tendencia de desaceleración, se estima que el crecimiento registrado de 7,5% para 2022 (Banco Mundial, 2023a) disminuirá al cierre de 2023, alcanzando una cifra no superior al 1%, según diferentes entidades económicas (imagen 4). Esta situación pondrá en mayor riesgo el margen de desigualdad existente, ya que en períodos con mejores cifras de crecimiento no lograron reducirse de manera suficiente. Como resultado, se impondrán nuevas restricciones a las oportunidades de desarrollo económico para diversos grupos sociales, especialmente en zonas como el departamento de Arauca. Esta región ha sido afectada por diversos factores, tales como el conflicto armado interno en Colombia y la inestabilidad en la frontera con Venezuela. A pesar de contar con desarrollos industriales significativos en la extracción de petróleo y gas, estos desafíos persisten sin superarse, lo que ha tenido un impacto considerable en la economía y ha generado una fuente importante de ingresos para el departamento.

El conflicto armado en la región de los Llanos orientales, específicamente en el departamento de Arauca, ha tenido repercusiones negativas en la economía y la vida social de la región, ocasionando el desplazamiento de población, daños a la infraestructura y limitaciones en las oportunidades de desarrollo; además, la situación en la frontera con Venezuela, marcada por la crisis política y económica en dicho país, ha tenido implicaciones en términos de migración, comercio y relaciones bilaterales.

Imagen 5

Tasa de crecimiento anual de Colombia, enero 2021p-marzo 2023pr

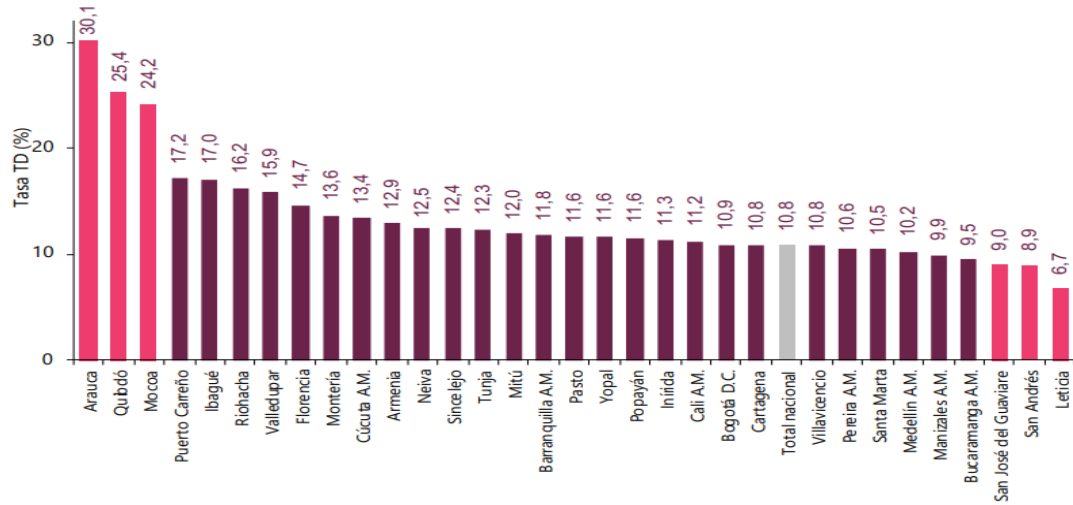


Nota. Información tomada de *Indicador de Seguimiento a la Economía (ISE)* (DANE, 2023).

Este comportamiento económico se refleja no solo en indicadores económicos tales como el de las exportaciones, que disminuyeron un 31,3% entre 2021 y 2022 (imagen 5) según el informe de perfiles económicos emitido por el Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (2023), sino también en las cifras de la fuerza laboral. Al cierre del mes de marzo, la ciudad de Arauca, capital del departamento de Arauca, se clasificaba como una de las ciudades con la mayor tasa de desempleo, alcanzando el 30% en comparación con el promedio nacional. Aunque la tasa de desempleo nacional ha disminuido después de la recuperación en la etapa postpandemia, se sitúa en un 10,8% para marzo de 2023, según las cifras del DANE (2023).

Imagen 6

Tasa de desempleo 32 ciudades y áreas metropolitanas. Abril 2022 a marzo 2023

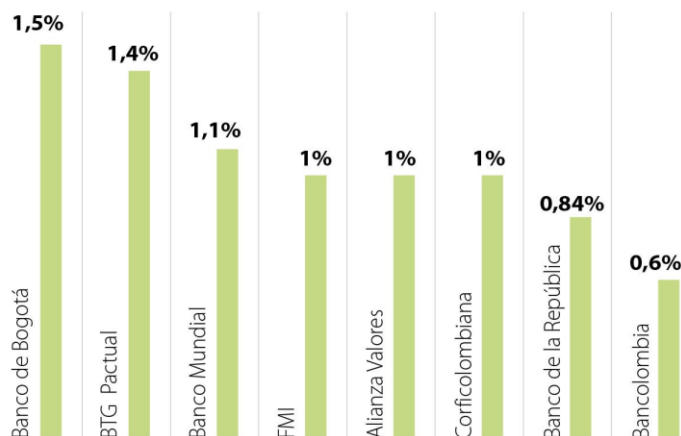


Nota. DANE, GEIH. (DANE, 2023)

Imagen 7

Proyecciones de crecimiento económico para Colombia en 2023

PROYECCIONES DE CRECIMIENTO ECONÓMICO PARA COLOMBIA EN 2023



FACTORES DE INFLUENCIA

- 1 Las tasas de interés que moderan las dinámicas de consumo
- 2 La inflación más alta desde 1999, lo que retrasa los procesos de gasto
- 3 Depreciación del peso colombiano
- 4 Mercado laboral menos dinámico
- 5 Es un año de ajuste e inversión
- 6 Es un fenómeno "corrección" de los excesos de la capacidad económica de 2021 y 2022

SECTORES QUE VERÁN EL IMPACTO

- Todos los relacionados con consumo
- Comercio
- Hotelería
- Restaurantes
- Entretenimiento
- Construcción
- Manufactura

SECTORES QUE PUEDEN SER RESILIENTES

- Servicios
- Agro

Fuente: BM, FMI, BR Corficolombiana, Banco de Bogotá, Alianza Valores

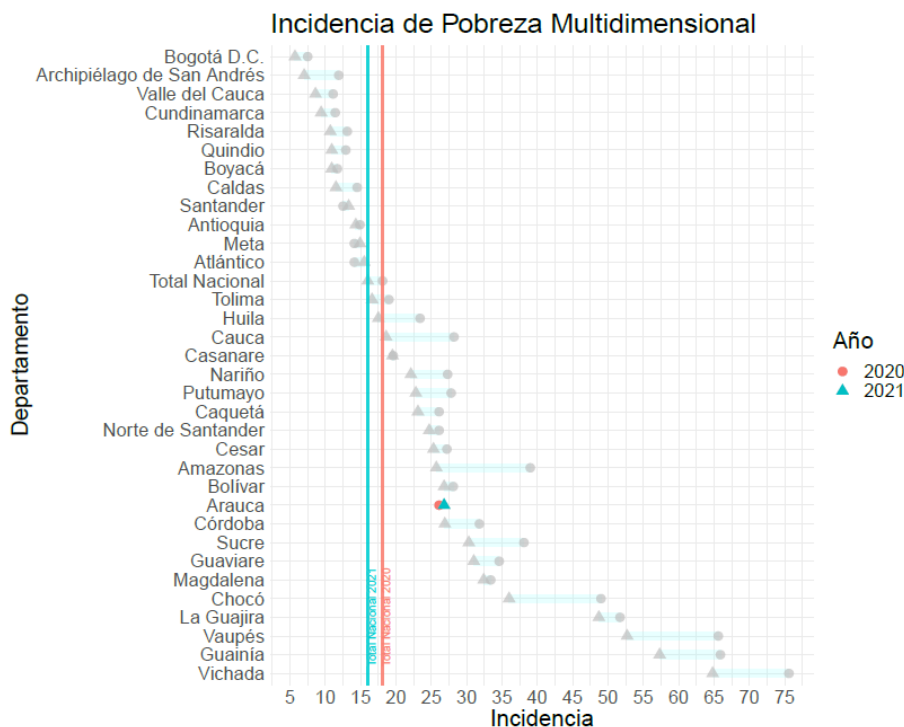
Nota. Gráfico tomado de *Proyecciones de crecimiento económico de Colombia para este año no superan 1,5%* (Arenales, 2023).

En el ámbito social (imagen 7), los retos en la región araucana son aún mayores, por cuanto, además de tener una alta tasa de desempleo, los niveles de pobreza multidimensional superan la media nacional, que para 2021 se situaba en un 16%

(imagen 8). En el departamento de Arauca (imagen 6), la cifra se eleva más del 25% en el mismo período (DANE, 2022). Esta situación se ve agravada por el complejo y prolongado conflicto armado que ha tenido un profundo impacto en su población. Durante décadas, esta región ha enfrentado desafíos significativos que han tenido un impacto directo en la calidad de vida de sus habitantes y en el desarrollo social y económico de la zona.

Imagen 8

Incidencia de pobreza multidimensional



Nota. Gráfico tomado de Gran Encuesta Integrada de Hogares GEIH. (DANE, 2022).

El conflicto armado en el departamento de Arauca se ha alimentado de una combinación de factores. Entre ellos, la presencia de grupos armados ilegales, las

disputas territoriales y los intereses económicos vinculados principalmente al narcotráfico. Estos grupos, principalmente guerrillas como el ELN y disidencias de las FARC, han ejercido control sobre vastas áreas del departamento, generando un clima de inseguridad y violencia generalizada.

Las consecuencias más graves de esta situación las ha sufrido la población civil. En particular, las comunidades rurales han enfrentado el desplazamiento forzado, la violación de los derechos humanos y la falta de acceso a servicios básicos como educación, salud y vivienda. Los niños y jóvenes, especialmente vulnerables, han sido obligados a abandonar sus hogares y a enfrentar la interrupción de su educación. Estos impactos se reflejan en cifras como las presentadas por el Observatorio de Niñez y Conflicto Armado (ONCA), que, de acuerdo con Unicef (2023), indican que, a nivel nacional: “El 60 % de los eventos armados registrados el año pasado afectaron directamente a 268.524 niños, niñas y adolescentes, un 11,5 % más que en el 2021” (párr. 5). Además, la violencia ha obstaculizado el desarrollo agrícola y ganadero, privando a la población de fuentes de ingresos estables. La infraestructura básica, como carreteras y servicios públicos, ha sufrido graves daños debido a los enfrentamientos y ataques armados, lo que ha dificultado aún más el progreso y la inversión en la región.

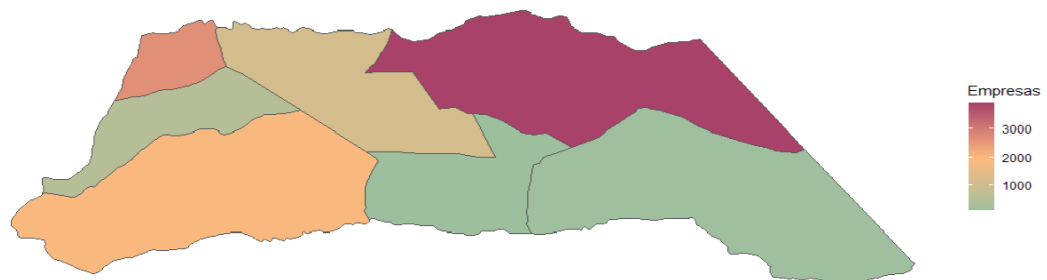
A pesar de estos desafíos, en los últimos años se han hecho esfuerzos significativos para buscar una solución pacífica al conflicto en el departamento de Arauca. El Gobierno colombiano, en colaboración con organizaciones sociales y la comunidad

internacional, ha implementado programas de desarrollo integral que buscan promover la reconciliación, mejorar las condiciones de vida de la población y fomentar la participación ciudadana.

Si bien la situación social es generalizada en todo el territorio del departamento de Arauca, el impacto principal del conflicto se observa en tres de sus siete municipios: Arauca (capital), Saravena y Tame. Estos tres municipios han compartido durante varios años el beneficio económico asociado al desarrollo de la industria de hidrocarburos. Esto se refleja en datos tales como cantidad de empresas registradas (imagen 9) y pobreza multidimensional asociada a estos tres municipios (imagen 10).

Imagen 9

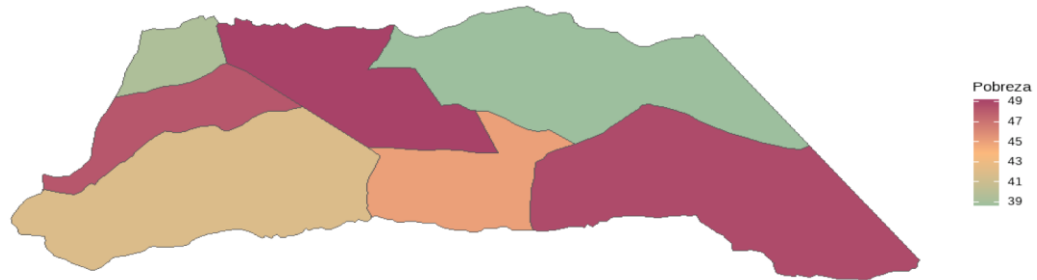
Cantidad de empresas registradas



Nota. Perfiles Económicos Departamentales. (Ministerio, 2023)

Imagen 10

Porcentaje de personas en condición pobreza multidimensional



Nota. Perfiles Económicos Departamentales (Ministerio, 2023)

La dinámica económica en el departamento de Arauca ha estado estrechamente vinculada al desarrollo histórico de exploración y producción de petróleo. En la década de 1980, se fortaleció con el descubrimiento del Campo Caño Limón, cerca del municipio de Arauquita, lo que tuvo una influencia significativa sobre la capital del departamento. Este descubrimiento fue hecho por la compañía Occidental Petroleum Corporation, también conocida como Oxy, un hallazgo que no solamente benefició al departamento, sino también a Colombia como exportador de hidrocarburos. Posteriormente, en la década de 1990, se hicieron descubrimientos adicionales en zonas cercanas a los municipios de Tame y Saravena. A pesar de las múltiples interrupciones causadas por las condiciones sociales y el conflicto armado, estos proyectos siguen estando activos en la actualidad (Sierracol, s. f.).

El contexto socioeconómico del departamento, especialmente en los tres municipios mencionados, no ha sido fácil de enlazar con el comportamiento económico agrícola que traía el departamento anterior a la influencia de los hidrocarburos. Esto ha afectado directamente a factores culturales, sociales y económicos de la región. Por ejemplo, los altos salarios de la industria petrolera y las considerables regalías que fluyen hacia el departamento han tenido diversos efectos, tales como el surgimiento de empresas locales dedicadas a bienes y servicios, migración laboral y un enfoque empresarial en proyectos de infraestructura, en lugar de impulsar iniciativas agroindustriales; además, ha tenido un impacto directo en los costos de vida en los municipios y ha despertado intereses particulares en la bonanza petrolera, tanto por parte de la población como de algunas autoridades locales, e incluso de los grupos armados, lo que se refleja en casos de corrupción y en un aumento de la inseguridad para la población. (Ministerio, 2023)

Las condiciones salariales para el desarrollo de proyectos de hidrocarburos en la región no solo son las más altas a nivel nacional, sino que también superan en más de un 30% el promedio de los salarios en el sector a nivel nacional. Esto se debe a las difíciles condiciones de acceso, habitabilidad y seguridad ocasionadas por el conflicto armado en la zona (DANE, 2023).

Para efectos del presente estudio, es importante considerar que tanto los salarios como otros costos asociados a acceso de bienes y servicios y logística son superiores al promedio manejado a nivel nacional no solo en lo relacionado con

mano de obra y salarios, sino también en lo referente a costos de servicios tales como transporte, izajes y alimentación.

7.2. ESTUDIO TÉCNICO

Uno de los principales retos de la industria de hidrocarburos es reducir el tiempo entre el descubrimiento de un pozo y el de ponerlo a producir, al tiempo que se garantiza la sostenibilidad en la evacuación de los fluidos hasta el cliente final. Esto se logra de manera eficiente mediante una adecuada infraestructura de transporte, especialmente en casos en los que no existen sistemas, tales como vías, oleoductos o gasoductos, lo cual, en este caso de estudio, se torna como una de las principales necesidades.

En el departamento de Arauca, la infraestructura de transporte es limitada, especialmente en el sur del departamento, donde los campos descubiertos en la década de 1990 no contaron con una infraestructura de transporte desarrollada. Por lo tanto, los nuevos proyectos requieren alternativas de transporte de hidrocarburos para permitir una producción de forma ágil y segura (DANE, 2023).

El caso de análisis del presente trabajo se enfoca en el área cercana a Tame, donde no existe una infraestructura de transporte de hidrocarburos disponible y el único oleoducto se encuentra a más de 30 kilómetros. Por lo tanto, la principal necesidad

es recolectar la producción, para poder, en el mejor de los casos, entregarla en dicho punto en el futuro.

Dadas estas condiciones de necesidad y considerando las condiciones ambientales, sociopolíticas y de seguridad que se tienen en la zona tratada del presente proyecto, es crucial establecer las características de los principales productos requeridos para implementar un proyecto de transporte de hidrocarburos. Se necesita una línea de flujo que permita transportar fluidos de producción con las características técnicas adecuadas para desarrollar la operación de manera segura en el menor tiempo posible. Para este análisis, evaluamos dos opciones de productos disponibles en el mercado, con el fin de determinar si es económica y técnicamente viable reemplazar el método de construcción convencional, de líneas de flujo en acero de carbono, por líneas de flujo de tubería flexible.

7.2.1. Oleoductos o gasoductos en acero al carbono

Los gasoductos en acero al carbono son infraestructuras utilizadas para transportar por largas distancias hidrocarburos tales como petróleo, gas natural u otros gases, de manera segura y eficiente. Estos gasoductos están contruidos con tuberías de acero al carbono, que es un tipo de acero compuesto principalmente por hierro y carbono, con un porcentaje de carbono generalmente inferior al 2% (Garvery, 2006).

A continuación, se presenta una descripción técnica básica de los principales componentes o partes que conforman los sistemas de oleoductos o gasoductos en acero al carbón.

- **Tuberías.** Las tuberías utilizadas en los oleoductos/gasoductos están fabricadas con acero al carbón de alta resistencia, que cumple con los estándares y especificaciones técnicas establecidos por la industria. Estas tuberías son largas secciones cilíndricas de acero, con diámetros que varían según las necesidades del proyecto.

- **Soldadura.** Las tuberías de acero al carbón se unen mediante soldadura, para formar tramos continuos de gasoducto. Se utilizan diversos métodos de soldadura, tales como la soldadura por arco eléctrico con electrodo revestido (SMAW), soldadura eléctrica por arco con electrodo de tungsteno con protección de gas (GTAW), y soldadura por arco con alambre tubular (FCAW) para garantizar una unión resistente y hermética.

- **Revestimiento.** Las tuberías de acero al carbono suelen estar recubiertas con materiales protectores para prevenir la corrosión y el desgaste. El revestimiento más común es una capa de polietileno o polipropileno, que actúa como barrera protectora contra el suelo y la humedad.

- **Recubrimiento externo.** Además del revestimiento, los oleoductos/ gasoductos de acero al carbón pueden contar con un recubrimiento externo adicional, para brindar una mayor protección. Este recubrimiento puede ser una capa de polietileno termocontraíble, cinta adhesiva anticorrosiva o pintura especializada.
- **Válvulas y estaciones de compresión.** A lo largo del gasoducto, se instalan válvulas para regular el flujo del gas y para permitir el mantenimiento y reparación de secciones específicas; además, se colocan estaciones de compresión en puntos estratégicos, donde el gas es comprimido para mantener la presión adecuada durante su transporte.
- **Supervisión y control.** Los oleoductos/gasoductos en acero al carbón están equipados con sistemas de supervisión y control, para monitorear el flujo de gas, la presión, la temperatura y otros parámetros relevantes. Esto permite detectar cualquier anomalía o fuga y tomar acciones preventivas o correctivas de manera oportuna.
- **Protección catódica.** Para prevenir la corrosión en las tuberías de acero al carbón, se utiliza un sistema de protección catódica. Este sistema consiste en la aplicación de corriente eléctrica o la instalación de ánodos de sacrificio, para proteger activamente las tuberías contra la corrosión electroquímica.

7.2.2. Oleoductos o gasoductos en tubería flexible

Los primeros intentos por crear tuberías flexibles se remontan a mediados del siglo XX, durante la Segunda Guerra Mundial, cuando se utilizaron materiales como el caucho y el tejido reforzado para construir ductos largos, continuos y flexibles; sin embargo, estas primeras soluciones tenían limitaciones en términos de resistencia y durabilidad, lo que restringía su uso en aplicaciones de alta presión y en entornos hostiles. A fines de la década de 1950, la tubería de polietileno comenzó a reemplazar a la tubería de metal en los sistemas de recolección de petróleo y gas (FlexSteel, 2017).

Posterior a 1950, el profesor alemán Karl Ziegler descubrió una nueva forma de obtener polietileno mediante la inyección de etileno en una suspensión de aluminio y éster titánico en un aceite, logrando la polimerización del etileno con liberación de calor y la obtención de un producto macromolecular (Guanilo, 2017).

A medida que la demanda de infraestructura para el completamiento de pozos y el transporte de hidrocarburos aumentaba, tanto los investigadores como la industria comenzaron a buscar alternativas más eficientes. En la década de 1960, se introdujeron nuevos materiales compuestos, tales como polímeros termoplásticos y termoendurecibles, que ofrecían una mayor resistencia y flexibilidad. Como resultado, las empresas de servicios públicos de gas comenzaron a reemplazar las tuberías de hierro defectuosas con tuberías de polietileno (Guanilo, 2017).

El desarrollo de la tubería flexible también se vio impulsado por avances en técnicas de fabricación, tales como la extrusión de múltiples capas y la incorporación de refuerzos metálicos. Estos avances permitieron la creación de tuberías flexibles capaces de soportar altas presiones y resistir condiciones extremas, como temperaturas elevadas y corrosión (Guanilo,2017).

En las últimas décadas, la tubería flexible ha demostrado ser una solución eficaz y confiable para la construcción de gasoductos y oleoductos en diversas aplicaciones. Su capacidad para adaptarse a terrenos irregulares, curvas pronunciadas y cambios de dirección ha sido especialmente valiosa en proyectos de infraestructura complejos. Además, la tubería flexible ofrece beneficios adicionales, como una instalación más rápida y sencilla, menor peso e impacto ambiental. Estas ventajas han llevado a un aumento significativo en su adopción en la industria de la construcción de gasoductos y oleoductos.

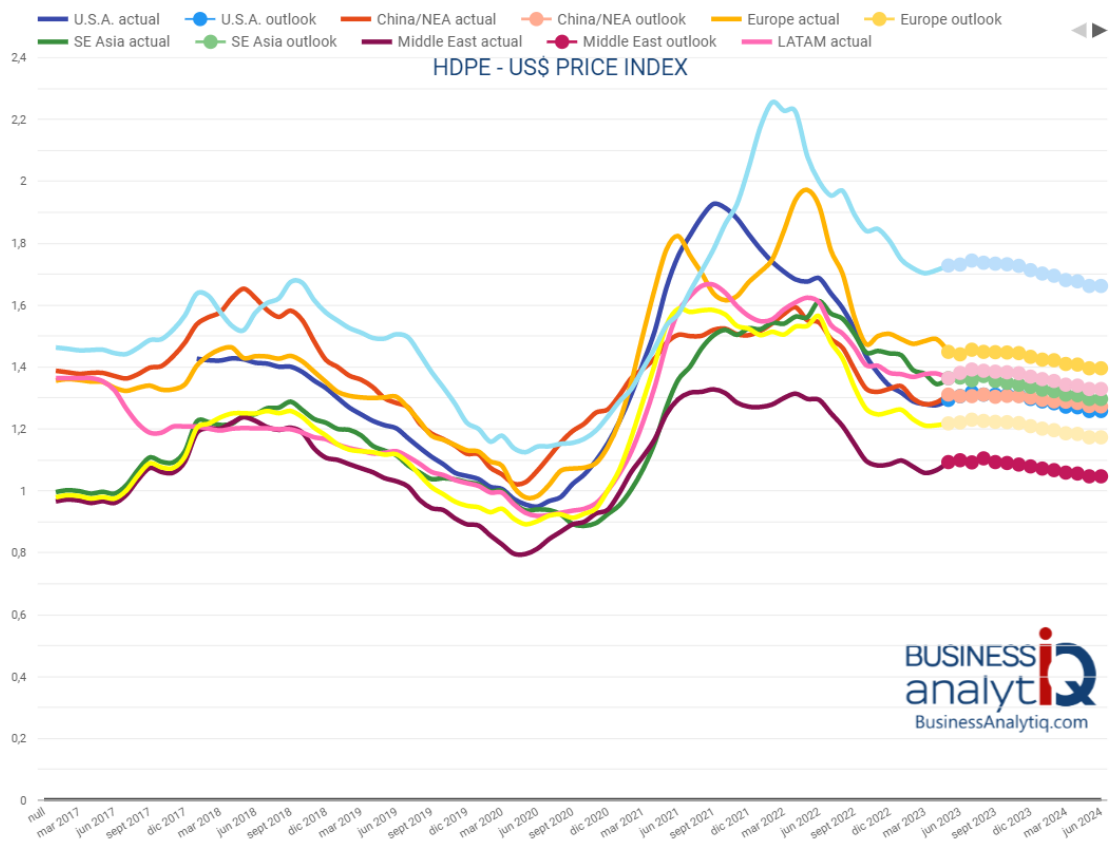
Este tipo de tuberías flexibles están principalmente compuestas de polietileno de alta densidad (HDPE, por sus siglas en inglés *high density polyethylene*). El polietileno, como mencionábamos anteriormente, se obtiene a partir de la polimerización del etileno y es químicamente inerte. La producción mundial de polietileno es de 60 millones de toneladas anuales (Guanilo, 2017).

Teniendo en cuenta lo anterior, es importante considerar que el precio del etileno como materia prima influye en el mercado de polietileno de alta densidad. El etileno,

al ser un producto petroquímico, está atado al comportamiento de los precios del petróleo a nivel mundial. El mercado de etileno está influenciado principalmente por la región de Asia Pacífico, que representa el 42,6 % de los ingresos totales. Esta tendencia también se aprecia en la imagen 11, donde se observa que los precios del HDPE tienen una menor variación en el mercado asiático versus el comportamiento histórico de regiones como Estados Unidos.

Imagen 11

HDPE – US\$ Price Index



Nota. Diagrama tomado de *HDPE 54 Price index* (Mike, s. f.).

Según el PMI (2013), el desarrollo de un proyecto se divide en cinco fases: inicio, planificación, ejecución, control y cierre. Anterior a la fase de inicio se lleva a cabo un estudio técnico, para cuantificar el valor agregado, los costos y los tiempos de inversión y operación. Este estudio involucra aspectos tales como la localización, la capacidad, los procesos, las obras físicas, los equipos y la tecnología, la programación y control y las materias primas.

En el estudio técnico, se recopilan y analizan fuentes primarias, secundarias y antecedentes de otros proyectos, para elaborar un diagnóstico que describa los procesos y las herramientas para desarrollar el presente trabajo de grado para optar para el título de maestría en gerencia de proyectos.

Teniendo en cuenta las diferencias en la instalación de las diversas tecnologías, a continuación, se hace una descripción general del proceso de construcción de líneas de flujo, las cuales se divide en las actividades con tubería convencional.

- Derecho de vía
- Replanteo topográfico y localización
- Descapote
- Apertura de zanja
- Tendido
- Doblado, alineación y soldadura
- Pruebas

- Bajado de tubería
- Tapado

En el caso de la tubería flexible, la diferencia es su instalación, para la cual, en lugar de requerirse doblado, alineación y soldadura, se desarrollan las siguientes actividades: corte y biselado, desenrolle y tendido de tubería, y, finalmente, los empalmes (*mid line and end fitting*, uno por lado) (FlexSteel,2021).

Se ha comprobado que instalar la tubería flexible requiere entre un 40% y un 80% del tiempo necesario para una tubería en acero al carbono, y su instalación demanda un requisito mínimo de mano de obra y equipo. Esto se debe a que se necesitan menos conexiones, ya que solo se requiere una conexión por cada carrete de tubería. Al reducir la cantidad de conexiones, se disminuye la posibilidad de incidentes, ya que estas son puntos de fuga.

Por otro lado, de acuerdo con proyectos que emplearon tubería convencional de acero al carbón, la soldadura representa un proceso crítico que requiere validación, lo cual impacta el proyecto. Además, por ser un proceso manual, el tiempo requerido para su instalación es largo, debido a las paradas continuas y a que se requiere un alto nivel de calidad para evitar reprocesos.

La tubería flexible está compuesta por capas termoplásticas que ofrecen propiedades de aislamiento térmico superiores a las del acero al carbón. Esto le confiere mayor confiabilidad, debido a su resistencia a la corrosión interna y externa, lo cual prolonga su vida útil, usualmente eliminando así los inhibidores de corrosión, los sistemas de protección catódica y las inspecciones periódicas requeridas para las tuberías de acero. En la tubería flexible, se puede utilizar el monitoreo de integridad en tiempo real en lugar de *marraneo*, que es utilizado para tuberías en acero al carbón.

La larga vida útil de la tubería flexible permite solventar los costos de mantenimiento a corto, mediano y largo plazo, lo contrario de lo que sucede en tuberías de acero al carbón.

La tubería flexible presenta características de flujo superiores, como resultado del bajo factor de fricción de flujo interno inherente al diseño de *ánima lisa*, aumentadas por las propiedades de aislamiento térmico que retienen el calor, minimizando la viscosidad del fluido transportado. Esto permite utilizar tuberías de menor diámetro en comparación con las tuberías en acero al carbón, para lograr el mismo caudal requerido.

El diseño de la tubería flexible permite realizar una prueba anular para garantizar la integridad de su capa externa. La *prueba de espacio anular* garantiza la integridad de la cubierta de la tubería después de la instalación y verifica que no se hayan

producido daños en la cubierta durante la construcción de la tubería. La prueba anular generalmente se completa antes de que se haya realizado la prueba hidrostática. La prueba anular se realiza instalando manómetros en ambos extremos de la tubería o en una sección de tubería en las conexiones de los accesorios. La prueba se inicia introduciendo nitrógeno, un gas comprimido inerte, en el espacio anular y se presuriza el espacio anular. La presión se mantiene durante un período predeterminado, mientras el técnico controla la pérdida de presión. Mientras que, en la tubería en acero al carbón, las fugas se evidencian en la prueba hidrostática.

Debido a la flexibilidad y menor peso de la tubería flexible, su transporte se facilita por medio de carretes de madera y reciclables, lo contrario de lo que ocurre con la tubería en acero al carbón, debido a su peso y a su diseño en la longitud.

Con la propuesta que propone un modelo de tubería flexible, se ha evidenciado que ayuda a reducir o mitigar las afectaciones ambientales y disminuye los gastos operacionales o de reparación de la red de tuberías, a corto, mediano y largo plazo.

Tomando en consideración las premisas mencionadas anteriormente, al comparar una tecnología con otra se busca identificar si la inversión en tecnologías de innovación para la construcción de líneas de flujo es o no es viable.

Las variables técnicas tenidas en cuenta para el presente trabajo de grado son las siguientes:

- Longitud del oleoducto: 2,4 km
- Diámetro: 6 pulgadas
- Espesor de pared tubería soldada: SCH40 – 7,11 mm
- Rata de flujo mínima requerida: 4000 barriles de petróleo por día
- Presión de operación: 290 psi

En cuanto al recurso humano necesario para la construcción de líneas de flujo, es importante considerar los requisitos de empleabilidad requeridos para cada una de las metodologías constructivas. En el caso de tubería soldada, se necesita una mayor cantidad de personal. Teniendo en cuenta que es una tecnología convencional, el proceso de contratación lleva más tiempo debido a la necesidad de contratar mano de obra local y de seguir procedimientos más rigurosos de selección, pruebas y certificación de soldadores. En contraste, en el caso de la tubería flexible, la demanda laboral es menor y los tiempos de contratación se reducen debido a la mano de obra especializada no encontrada localmente.

A continuación, se listan los requerimientos de mano de obra de dos casos (tablas 1 y 2), reflejados como oportunidades laborales requeridas para cada uno de los procesos constructivos. Lo anterior, partiendo del análisis base de tener en ambos casos una línea de flujo de longitud de 2,4 km y tubería de 6 pulgadas.

6.2.2.1. Caso 1. Sistema de construcción convencional en tubería soldada (tabla 1).

Tabla 1

Personal requerido utilizando tubería soldada

Tubería soldada	
Cargo	Número
Negociador de tierras	1
Topografía	3
Ingeniero civil, residente de obra	1
Interventor ambiental & HSE	2
Supervisor de obra civil	1
Supervisor de obra mecánica	1
Operarios de maquinaria y equipo pesado	3
Técnicos de la prueba hidrostática	2
Personal de apoyo (obreros)	6
Soldador	2
Ayudante soldadura	4
Tuberos – alineadores	2
Total	28

6.2.2.2. Caso 2. Sistema de construcción en tubería flexible (tabla 2)

Tabla 2

Personal requerido utilizando tubería flexible

Tubería flexible	
Cargo	Número
Negociador de tierras	1
Topografía	3
Ingeniero civil, residente de obra	1
Interventor ambiental & HSE	2
Supervisor de obra civil	1
Supervisor de obra mecánica	1
Operarios de maquinaria y equipo pesado	3
Técnicos de la prueba hidrostática	2
Personal de apoyo (obreros)	6
Grafador	1
Ayudante grafador	1
Alineadores	1
Total	23

Lo anterior plantea un desafío organizacional y social, dado que, además de tener un esquema de menor empleabilidad para construcción de líneas de flujo en tubería

flexible, se requiere poder entrenar mano de obra local, para evitar conflictos que puedan convertirse en mayores tiempos de ejecución del proyecto.

7.3. NORMATIVIDAD AMBIENTAL Y LEGAL

7.3.1. Normatividad ambiental

Para el desarrollo de proyectos, se deben cumplir los requerimientos ambientales aprobados por la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA, 2021):

Objeto

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales ANLA es la encargada de que los proyectos, obras o actividades sujetos de licenciamiento, permiso o trámite ambiental cumplan con la normativa ambiental, de tal manera que contribuyan al desarrollo sostenible del País. (párr. 5)

El proceso inicia luego de la firma del contrato con la Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH). Antes de la etapa de exploración de cada bloque, se deben adelantar los siguientes trámites previos a la radicación del estudio de impacto ambiental (EIA) ante la ANLA.

Los tiempos requeridos por cada trámite fueron tomados de la Asociación Colombiana del Petróleo (ACP, 2012):

- Permiso de investigación científica. Tiempo promedio: tres meses.

- Instituto Colombiano de Antropología e Historia (ICANH). Tiempo promedio: dos meses.

- Sustracción áreas de reserva. Tiempo promedio: 6 meses.

- Elaboración del EIA. Tiempo promedio: 6 meses.

- Solicitud LA (Licencia Ambiental). Tiempo promedio 15 meses.

Cuando es una línea menor a 6 pulgadas, se presenta ante la Corporación Autónoma Regional (CAR).

- Modificación de LA: Tiempo promedio 16 meses.

El estudio de impacto ambiental (EIA) se presenta ante la ANLA (2021), con el fin de mitigar los impactos negativos con el medio ambiente. Una vez aprobado, la ANLA les hace seguimiento a los parámetros ambientales establecidos en la licencia ambiental.

Los decretos ambientales que se deben seguir para la solicitud de permisos o licencias son los que se describen a continuación.

- **Decreto 2041. Licencias ambientales.** Título II. Artículo 8°. Competencia de la Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) (Presidencia de la República, 2014):

- d) El transporte y conducción de hidrocarburos líquidos y gaseosos que se desarrollen por fuera de los campos de explotación que impliquen la

construcción y montaje de infraestructura de líneas de conducción con diámetros iguales o superiores a seis (6) pulgadas (15.24 centímetros), incluyendo estaciones de bombeo y/o reducción de presión y la correspondiente infraestructura de almacenamiento y control de flujo salvo aquellas actividades relacionadas con la distribución de gas natural de uso domiciliario, comercial o industrial.

- **Decreto 2820. Licencias ambientales.** Título I Artículo 4° (Presidencia de la República, 2010a):

Para el desarrollo de obras y actividades relacionadas con los proyectos de explotación minera y de hidrocarburos, la autoridad ambiental competente otorgará una licencia ambiental de carácter global, que abarque toda el área de explotación que se solicite.

En este caso, para el desarrollo de cada una de las actividades y obras definidas en la etapa de hidrocarburos será necesario presentar un Plan de Manejo Ambiental, conforme a los términos, condiciones y obligaciones establecidas en la licencia ambiental global. Dicho Plan de Manejo Ambiental no estará sujeto a evaluación previa por parte de la autoridad ambiental competente; por lo que una vez presentado, el interesado podrá iniciar la ejecución de las obras y actividades, que serán objeto de control y seguimiento ambiental.

- **Decreto 4728. Hidrocarburos.** Artículo 3° (Presidencia de la República, 2010b):

El artículo 35 del Decreto 3930 de 2010, quedará así: “Artículo 35. Plan de Contingencia para el Manejo de Derrames de Hidrocarburos o Sustancias Nocivas. Los usuarios que exploren, exploten, manufacturen, refinen, transformen, procesen, transporten o almacenen en hidrocarburos o sustancias nocivas para la salud y para los recursos hidrobiológicos, deberán estar provistos de un plan de contingencia y control de derrames, el cual deberá contar con la aprobación de la autoridad ambiental competente.

7.3.2. Normatividad aplicada en fabricación

Para la toma de decisión de inversión, en cuanto a la viabilidad de invertir en tecnologías de innovación que utilice tubería flexible en proyectos de construcción de líneas de flujo para transportar hidrocarburos en el campo petrolero de una compañía ubicada en Tame, se deben tener en cuenta las normas, resoluciones, estándares para el cumplimiento legal que se describen a continuación.

Existen dos tipos de documentos regidos y comunes para las tuberías flexibles: 1. Prácticas y estándares recomendados por la industria. 2. Códigos y regulaciones nacionales.

7.3.3. Normas de diseño y fabricación de tubería de acero flexible

El Instituto Americano del Petróleo (API, por sus siglas en inglés American Petroleum Institute) ha desarrollado prácticas y normas recomendadas por la industria, tales como las que se describen a continuación.

- **API RP 15S. Qualification of Spoolable Reinforced Plastic Line Pipe.** Esta práctica recomendada menciona pautas para el diseño, la fabricación, la calificación y la aplicación de tuberías de plástico reforzado en aplicaciones de líneas de flujo en campos petroleros, para transporte de fluidos multifásicos, gases, líquidos y agua. Estas tuberías están compuestas por un revestimiento de plástico continuo reforzado con *epoxi* y vidrio, que forman un sistema enrollable continuo, con facilidad de almacenamiento, transporte e instalación (API, 2006).

Esta práctica contiene recomendaciones sobre la selección de materiales, la calificación del producto y la clasificación de presión. Incluye pruebas de control de calidad, pruebas hidrostáticas, dimensiones, propiedades de los materiales, propiedades físicas y requisitos mínimos de rendimiento.

Las pruebas de calificación están diseñadas alrededor de refuerzos no metálicos, exhibiendo propiedades mecánicas dependientes del tiempo caracterizadas por análisis de regresión.

Se aplica, mas no se limita, a sistemas de línea de flujo de plástico reforzado enrollable de hasta 6” de diámetro, presiones hasta 5000 psi y temperaturas máximas de 200 °F. Se limita a la tubería y accesorios de los extremos, y no se relaciona con otros componentes del sistema. Cubre los sistemas de tuberías donde la presión y la carga térmica son estáticas o cíclicas, con cargas resultantes de métodos de instalación típicos.

Las variantes de producto se califican de acuerdo con este estándar, como parte del proceso de desarrollo de productos.

- **API 17J – Specification for un-bonded flexible pipe.** Esta práctica define los requisitos técnicos para tuberías flexibles intercambiables seguras, dimensionales y funcionales, que están diseñadas y fabricadas con estándares y criterios uniformes (API, 2014).

Se especifican los requisitos mínimos para el diseño, la selección de materiales, la fabricación, las pruebas, el marcado y el embalaje, con referencia a los códigos y normas existentes. Aplica a conjuntos de tuberías flexibles no adheridas, que consisten en segmentos con accesorios de extremo unidos a ambos extremos. Incluye aplicaciones de exportación e inyección. Los productos de producción incluyen petróleo, gas, agua y productos químicos de inyección. Aplica a tuberías flexibles tanto estáticas como dinámicas.

Con este estándar, se verifican el diseño y los materiales de la tubería.

- **API 17K. Specification for bonded flexible pipe.** Esta especificación define los requisitos técnicos para tuberías flexibles seguras, dimensional y funcionalmente intercambiables, que están diseñadas y fabricadas con estándares y criterios uniformes (API, 2017).

Se especifican los requisitos mínimos para el diseño, fabricación, selección de materiales, pruebas, marcado y embalaje. Aplica a conjuntos de tuberías flexibles adheridas, que consisten en segmentos con accesorios finales o bridas integradas unidas a ambos extremos.

Aplica a tuberías flexibles tanto estáticas como dinámicas.

- **API 17B. Recommended practice for flexible pipe.** Esta práctica recomendada proporciona pautas para el diseño, análisis, fabricación, prueba, instalación y operación de tuberías flexibles para aplicaciones en tierra, submarinas y marinas (API, 1998).

Se especifican los requisitos mínimos para el diseño, fabricación, selección de materiales, pruebas, marcado y embalaje. Aplica a conjuntos de tuberías flexibles adheridas y no adheridas, que consisten en segmentos con accesorios finales

unidos a ambos extremos. Se cubren los tipos de tubería con y sin unión. Incluye los sistemas auxiliares.

Aplica a tuberías flexibles tanto estáticas como dinámicas.

- **API 5L. Specification for line pipe.** Las especificaciones API 5L se utilizan principalmente para el transporte de gas natural y petróleo. Aplica a tuberías de acero al carbón (API, 2004).

7.3.4. Códigos y regulaciones nacionales

- **Norma ASTM D380.** Esta norma establece los requisitos generales para tuberías flexibles de polietileno (PE), incluyendo los métodos de prueba, los procedimientos para la inspección y pruebas, las dimensiones y las propiedades físicas (ASTM, 2015).

- **Norma ASTM D-2513.** Esta norma aplica a las tuberías y accesorios termoplásticos para gas, y cubre los requisitos y métodos de prueba para cada uno de los componentes, para la instalación y puesta en marcha de instalaciones de tuberías enterradas o distribución de gas natural (ASTM, 2020).

- **ISO 13628.** Esta norma proporciona requisitos y recomendaciones generales para el desarrollo de sistemas de producción, desde la fase de diseño (ISO, 2005).
- **ISO 15465.** Esta norma especifica los requisitos para el diseño, la fabricación y la prueba hidrostática (ISO, 2004).
- **Norma ANSI/CSA LC1.** Esta norma se aplica a las tuberías flexibles de gas utilizadas en sistemas de suministro de gas natural. Establece los requisitos para diseño, materiales, construcción, pruebas y marcado de las tuberías flexibles de gas (ANSI, 2005).
- **ASTM F2805 – standard specification for multilayer thermoplastic and flexible steel pipe and connections.** Esta especificación cubre los requisitos y métodos de prueba para materiales, dimensiones, mano de obra, marcas para tubería de acero flexible multicapa fabricadas en fábrica con capas internas y externas de termoplástico y conexiones finales (ASTM, 2022).

Cubre tamaños nominales de 2 a 8 pulgadas. Las tuberías termoplásticas multicapa están destinadas al transporte de petróleo, gas natural, productos químicos peligrosos, industriales y agua.

- **ISO 18226.** Esta especificación menciona el uso de sistemas de tuberías termoplásticas reforzadas para la transmisión de combustibles gaseosos a presiones operativas máximas de hasta 40 bares, y temperaturas de servicio en la región de -50 °C a 120 °C, dependiendo del revestimiento y los materiales de la cubierta (ISO, 2006).

- **ASTM D3350.** Proporciona estándares para los parámetros de material de tuberías y accesorios adecuados para su uso en el transporte de petróleo, gas y agua no potable, en servicios subterráneos (ASTM, 2021).

Cubre la identificación de materiales de tubería y accesorios de plástico de polietileno. La clasificación de las celdas de los materiales es de acuerdo con las propiedades primarias. Los materiales se fabrican por moldeo y extrusión de plástico de polietileno.

El estabilizador de color y ultravioleta, la estabilidad térmica, la temperatura de fragilidad, la densidad, la resistencia a la tracción en el límite elástico y el alargamiento a la rotura deben cumplir con dicha especificación.

- **ASME B31.4. Liquid transportation systems for hydrocarbons, liquid petroleum gas, anhydrous ammonia and alcohols.** Establece requisitos para diseño, materiales, construcción, inspección y pruebas de tuberías de

transporte de líquidos de transporte de líquidos, tales como petróleo crudo, condensados, gasolina natural, gas natural líquido, gas licuado de petróleo, dióxido de carbono, alcohol líquido, amoníaco anhídrido y productos líquidos del petróleo, entre las instalaciones del productor, el tanque de almacenamiento, las plantas de procesamiento de gas natural y las refinerías (ASME, 2019).

- **ASME B31.8. Gas transmission and distribution piping systems.**

Establece el diseño, fabricación, inspección y pruebas de instalaciones de ductos usados para el transporte de gas. Este Código también abarca los aspectos de seguridad de la operación y mantenimiento de dichas instalaciones (ASME, 2018).

7.4 ESTUDIO FINANCIERO

Para este estudio, se consideraron los precios base de bienes, servicios y materiales aplicables a cada uno de los métodos constructivos, con el fin de poder evaluar y comparar las condiciones que permiten tener viabilidad técnica y económica para un sistema de transporte de hidrocarburos en tubería flexible.

Para efectos del estudio financiero, se consideraron las variables técnicas mencionadas anteriormente y las siguientes variables macroeconómicas:

- Tasa representativa del mercado frente al dólar americano: COP4500.
- Impuestos vigentes: IVA 19% y cargos bancarios del 4 x 1000.

- Tarifas, valores de servicios y salarios asociados con cifras llevadas a valores corrientes del 2023.

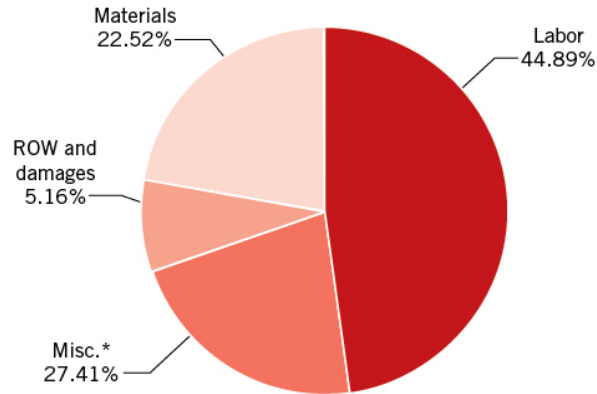
Teniendo en cuenta las principales fases y procesos involucrados en la construcción de oleoductos o gasoductos en acero al carbón, se identifican las siguientes variables a considerar dentro de la estructura de costos:

- Costo de materiales y(o) materia prima.
- Costo de mano de obra (directa e indirecta).
- Costo de maquinaria y equipos.
- Costos de consumibles (material de aporte, accesorios, gases, etc.).
- Costos de procesos complementarios (derecho de vía, excavación, preparación, corte, biselado, etc.).

A continuación, se puede evidenciar cómo, según la Comisión Federal Reguladora de Energía (US FERC) (Smith, 2022), se tienen porcentajes de composición de costos para construcción de líneas de flujo muy similares, en donde la mano de obra toma aproximadamente el 45%, los materiales, entre 23% y 30%, y los misceláneos o consumibles, entre el 20% y 27%, principalmente (imágenes 11 y 12).

Imagen 12

Pipeline construction cost – estimated

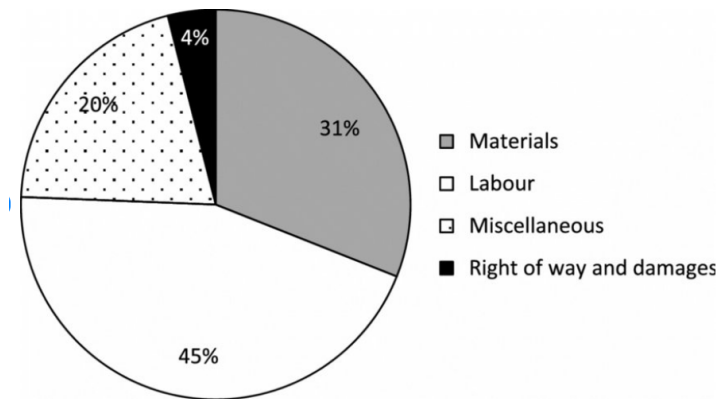


*Generally includes surveying, engineering, supervision, administration and overhead, interest, contingencies and allowances for funds used during construction (AFUDC), and regulatory filing fees.
Source: US FERC construction permit filings, July 1, 2021, to June 30, 2022

Nota. Gráfico tomado de *Pipeline materials' cost increases lift overall construction price*. Oil & Gas Journal (Smith, 2022).

Imagen 13

Pipeline construction cost components



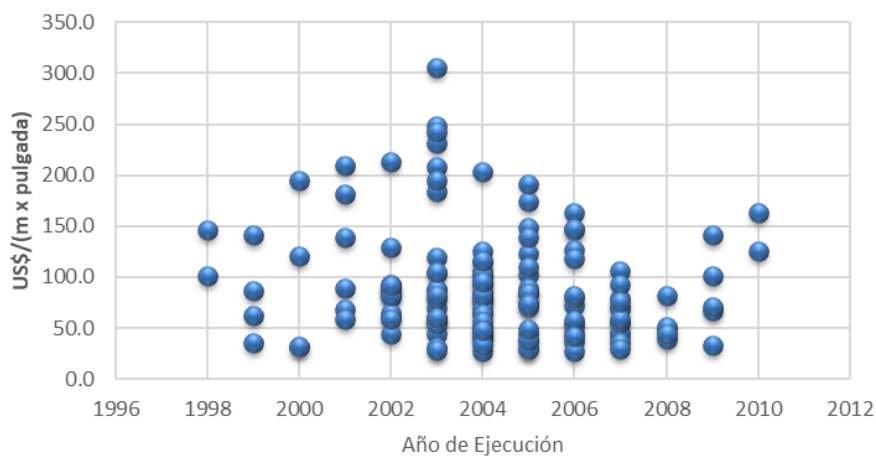
Pipeline construction cost components. Source of data: [18]18. Smith, C. 2010. Natural gas pipelines continue growth despite lower earnings; oil profits grow. Oil & Gas Journal, 108(41): 102–123. View all references.

Nota. Gráfico tomado de *Pipeline materials' cost increases lift overall construction price*. Oil & Gas Journal (Smith, 2022).

De igual manera, se ha tomado una base de datos de 141 oleoductos construidos a nivel mundial publicada por *Oil & Gas Journal* (Smith, 2022) (anexo 1). A partir de esta base de datos, se calcula el promedio del costo final de construcción por cada unidad constructiva; es decir, se determina el costo final unitario por metro construido de cada proyecto. Sin embargo, se considera la variable diametral, ya que el rendimiento se ve afectado no solo por la distancia a cubrir, sino también por la soldadura requerida, la cual es proporcional al diámetro de la tubería (gráfica 1).

Gráfica 1

Costos construcción oleoductos y gasoductos



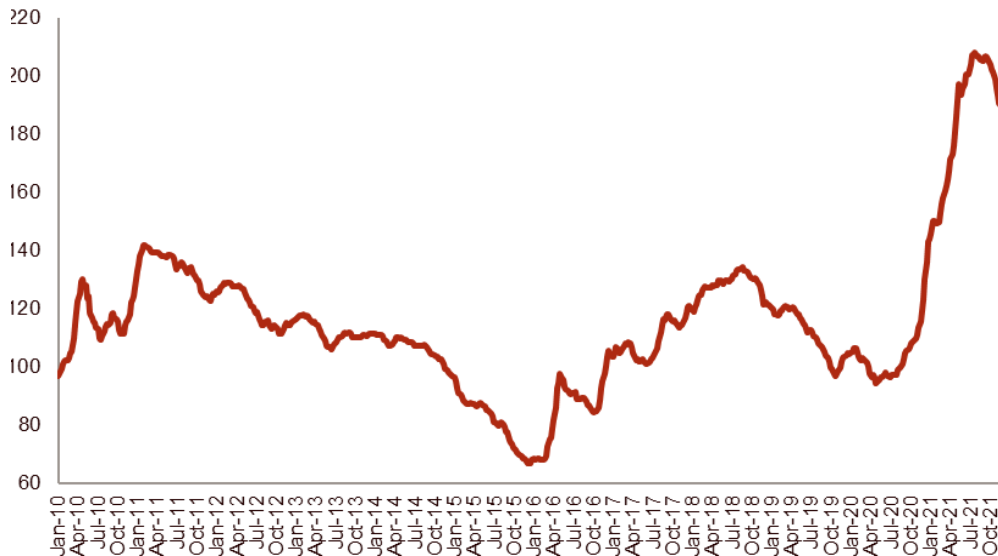
Nota. Gráfica tomada del anexo 1, oleoductos-gasoductos, histórico.

En la gráfica anterior se presenta una consolidación del costo final por metro y pulgada de diámetro, con indexación de costos a 2023, para los 141 oleoductos construidos. A partir de esta información, se ha determinado un costo promedio de USD90 por metro-pulgada de oleoducto o gasoducto.

Con el fin de actualizar los costos de construcción desde 2010 traídos a 2023, se han considerado diversos indicadores del comportamiento de incremento de costos a nivel nacional y global. En primer lugar, se ha tomado como referencia el comportamiento de los precios del acero a nivel mundial, el cual se obtuvo de un informe del *Metal Bulletin Research* (s.f). Según dicho informe, los precios del acero mostraron incrementos cercanos al 85% entre 2010 y 2021, especialmente debido a los considerables aumentos de precios que se han tenido a nivel mundial en la época posterior a la pandemia de covid-2019.

Imagen 14

Global Steel Price index



Nota. Metal Bulletin Research (s.f).

De igual manera, es necesario ajustar los costos asociados a mano de obra y materiales consumibles en general. Para este fin, se ha tomado como referencia el

comportamiento de los indicadores económicos a nivel nacional y en Estados Unidos que se describen a continuación.

6.4.1.1. De la U.S. Bureau of Labor Statistics, la principal agencia de investigación del Gobierno Federal en el campo de la economía y las estadísticas laborales en los Estados Unidos, se han utilizado los siguientes índices relevantes:

- Índice de precios al productor (PPI) por industria, para fabricación de tubos y tubos de hierro y acero, a partir de acero comprado (BLS Beta Labs, s. f.).
- Índice de precios al productor (PPI) por industria, para la fabricación de maquinaria y equipos para campos de petróleo y gas (BLS Beta Labs, s. f.).
- Índice de precios al productor (PPI) por producto, para todos los productos (FRED Economic Data, s. f.).

6.4.1.2. Del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), en Colombia, se han tomado dos variables que determinan el comportamiento de los costos de bienes y servicios nacionales y los costos de mano de obra:

- Índice de precios al consumidor (IPC), publicado por el DANE (2023) como medida del cambio (variación), en el precio de bienes y servicios representativos del consumo de los hogares del país, conocido como canasta.

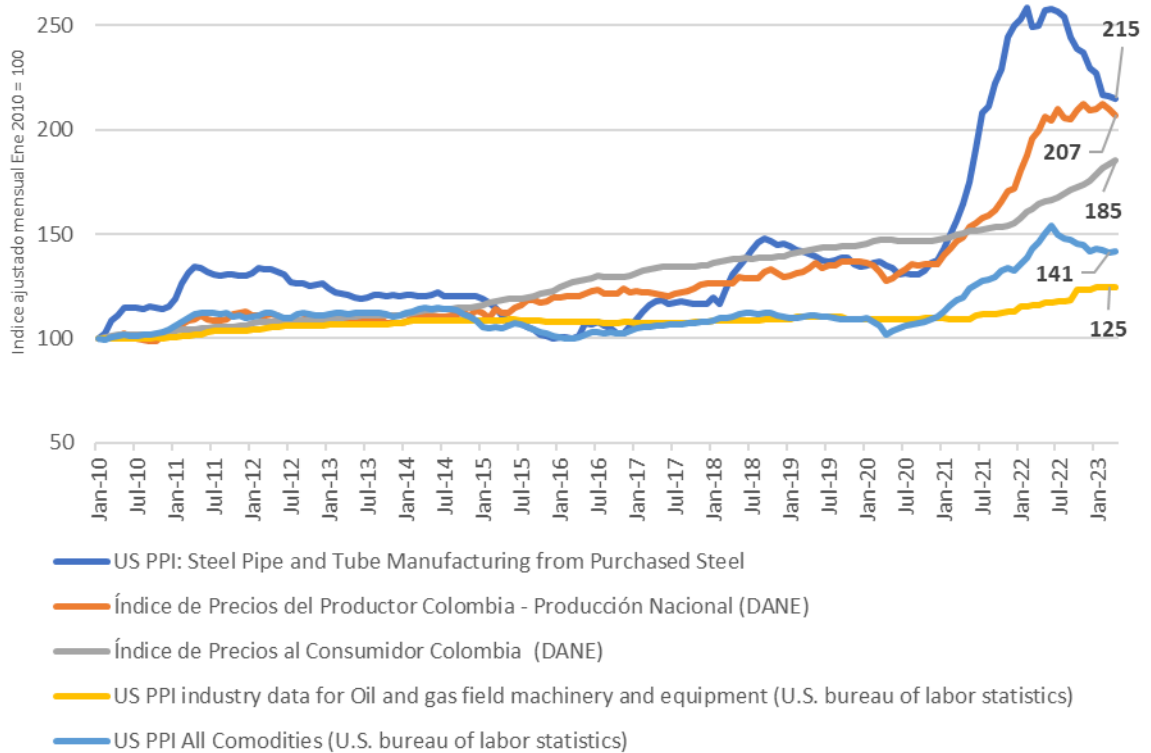
- Índice de precios al productor (IPP), publicado por el DANE (2023), como indicador coyuntural sobre los precios de los bienes en el primer canal de distribución; es decir, precios del productor. Este índice reporta la variación promedio de los precios de una cesta de bienes producidos en el país para consumo interno y para exportación; incluye sector primario y secundario.

Teniendo en cuenta estos indicadores, se ha elaborado una serie comparativa tomando las variaciones mensuales con referencia a un valor determinado de 100 unidades para enero de 2010. En la gráfica 2, se puede observar el cambio que ha tenido cada indicador entre enero de 2010 y el primer trimestre de 2023.

El promedio de ajustes para los 5 indicadores es de 175 unidades, lo que representa una variación del 75%. Por lo tanto, se ha tomado este valor como un indicador conservador de ajuste de los costos de construcción entre 2010 y 2023.

Gráfica 2

Índices de costos históricos



Nota. Diagrama tomado del anexo 2. Índices de costos históricos.

Según lo mencionado en el diseño metodológico, el análisis se desarrolla siguiendo los pasos que se describen a continuación.

7.4.1 Análisis detallado de costos

En esta etapa se realiza un desglose de los costos asociados a mano de obra, materiales, servicios asociados, gastos administrativos y logísticos, así como los que respectan a gastos financieros e impositivos asociados al proyecto. Lo anterior

para los dos casos en estudio que se describen a continuación: caso 1, sistema de construcción convencional en tubería soldada y caso 2, sistema de construcción en tubería flexible. Es así como se discriminan para cada caso los costos fijos versus aquellos costos variables, donde estos últimos tendrían un cambio como efecto de cambiar la longitud de la línea de flujo.

A continuación, se listan los ítems identificados en ambos casos, junto con las cantidades estimadas para cada caso de análisis. Es importante destacar que los costos promedio obtenidos de los precios del mercado corresponden a valores en dólares del 2021, los cuales se convierten a pesos colombianos utilizando la tasa promedio de ese año (TRM COP3.743). Posteriormente, se realizan las indexaciones correspondientes a los costos de bienes y servicios de acuerdo con el índice de precios al productor publicado por el DANE (2022) para el cierre de los años 2021 y 2022. Esto permite estimar los valores vigentes para poder comparar ambas tecnologías constructivas.

6.4.1.1. Caso 1. Sistema de construcción convencional en tubería soldada

En este caso, se listan y clasifican las tareas principales asociadas con la diferenciación de gastos fijos y variables que permitan identificar el comportamiento del costo final para proyectos de la misma tecnología, pero con una mayor longitud de tramos de línea de flujo construido (tabla 3).

Tabla 3

Presupuesto para sistema de construcción convencional en tubería soldada

CASO 1 - Sistema de Construcción Convencional en Tubería Soldada				USD 2021	COP 2023	COP	2023
CATEGORÍA	ITEM	UNIDAD	CANT	VALOR UN	VALOR UN	VALOR FLUO	VALOR VARIABLE
INGENIERIA Y SUPERVISION						\$166.092.541	\$701.279.617
Diseños e Ingeniería	Ingeniería conceptual y detallada	Horas	800	\$36	\$207.616	\$	-
Supervisión	Gastos manutención y administrativos	Meses	4	\$5.000	\$28.835.511	\$	115.342.042,20
Supervisión	Supervisión Técnica y administrativa (2 interventores)	Dias Hombre	240	\$290	\$1.672.460	\$	401.300.306,86
Servicios de localización y replanteo	Topografía	Km	2,4	\$8.333	\$48.059.184	\$	115.342.042,20
Transportes Aéreos o Terrestres	Transporte local vía aérea	Meses	1	\$12.000	\$69.205.225	\$	69.205.225,32
BIENES Y SERVICIOS						\$190.314.370	\$1.869.894.504
Construcción de línea flujo soldada y ensamblada	Excavación, bajado y tapado	Metros Lineales	2400	\$39	\$224.023	\$	539.815.618
	Soldadura y recubrimiento	Metros Lineales	2400	\$29	\$167.240	\$	401.375.446
Servicios de ensamble eléctrico	Protección catódica	Km	2,4	\$17.500	\$100.924.287	\$	242.218.289
Servicios de Adecuación y Obras civiles	Adecuaciones y movimientos de tierra (Geotecnia)	Km	2,4	\$49.583	\$285.952.146	\$	686.285.151
Servicios de transporte e izaje	Transporte Carga Secca (Materiales, equipos, gruas, etc)	Unidad	6	\$2.000	\$11.534.204	\$	-
Servicios de ensamble instrumentación	Trabajos de instalación de montaje de instrumentación	Global	1	\$21.000	\$121.109.144	\$	-
EQUIPOS / DISPOSITIVOS PROCESO						\$1.009.242.869	\$1.073.027.019
Instrumentación para control y automatización	Control System Switch	Global	1	\$20.000	\$115.342.042	\$	-
	Instrumentación y/o válvulas de control	Global	1	\$35.000	\$201.848.574	\$	-
Materiales de Conexonado y Tubería	Accesorios de conexonado de tubería	Global	1	\$40.000	\$230.684.084	\$	-
	Tubería de 6 pulgadas, X42 Sch 40 3LPP	Metros Lineales	2658	\$70	\$403.897	\$	1.073.027.019
	Manifold #300	Unidad	1	\$30.000	\$173.013.063	\$	-
	Trampas para merranos ANSI 300#	Unidad	2	\$25.000	\$144.177.553	\$	288.355.106
SOCIAL AMBIENTAL Y SEGURIDAD						\$461.368.169	\$550.191.188
Social	Gastos sociales relacionamiento y socialización	Global	1	\$40.000	\$230.684.084	\$	230.684.084
Seguridad Física	Aseguramiento y logística seguridad física	Global	1	\$20.000	\$115.342.042	\$	115.342.042
Negociación de tierras	Land negotiation	Ha	2,1	\$11.842	\$68.294.630	\$	143.418.724
Estudios y permisos ambientales	Land Permits & Fences	Global	1	\$10.526	\$60.706.338	\$	60.706.338
	Plan de Manejo Ambiental	Global	1	\$80.000	\$461.368.169	\$	461.368.169
Subtotal						\$1.827.017.948	\$4.194.152.327
Impuestos		19%				\$	347.133.410
Costos Administrativos		5,0%				\$	91.350.897
Cargos bancarios		4%/1000				\$	7.308.072
Subtotal Final						\$2.272.810.328	\$5.217.525.495
Contingencia		2%				\$	36.540.359
TOTAL						\$2.309.350.687	\$5.301.408.542
						2,4	\$7.610.759.229
						5	\$13.353.951.816
						10	\$24.398.552.944
						20	\$46.467.755.202
						Longitud (km)	

Nota. Tabla tomada del anexo 3, presupuesto líneas de flujo.

Presupuesto total para el caso 1, COP7.610.759.229, con valores corrientes al 2023.

6.4.1.2. Caso 2. Sistema de construcción en tubería flexible

Luego de listar las actividades que se desarrollan como servicios adicionales a los bienes requeridos para la construcción de este tipo de líneas de flujo flexibles, se realiza el ejercicio de clasificar costos fijos y variables, con el fin de entender cuáles costos se verían afectados por el cambio de tecnología y, por ende, podrían mantenerse fijos en distancias entre 2,6 y 20 kilómetros (tabla 4).

Tabla 4

Presupuesto para sistema de construcción en tubería flexible

CASO 2 - Sistema de Construcción en Tubería Flexible				USD 2021	COP 2023	COP	2023
CATEGORÍA	ITEM	UNIDAD	CANT	VALOR UN	VALOR UN	VALOR FLUO	VALOR VARIABLE
INGENIERIA Y SUPERVISION						\$166.092.541	\$364.480.853
Diseños e Ingeniería	Ingeniería conceptual y detallada	Horas	800	\$36	\$207.616	\$	-
Supervisión	Gastos manulacion y administrativos	Meses	1,5	\$5.000	\$28.335,511	\$	\$ 43.253.298
Supervisión	Supervision Tecnica y administrativa (2 interventores)	Dias Hombre	90	\$200	\$1.872.460	\$	\$ 150.521.365
Servicios de localizacion y replanteo	Topografía	Km	2,4	\$8.333	\$48.059.194	\$	\$ 115.342.042
Transportes Aereos o Terrestres	Transporte local via aerea	Meses	0,8	\$12.000	\$69.205.225	\$	\$ 55.364.180
BIENES Y SERVICIOS						\$ 179.672.133	\$ 1.049.431.968
	Realización de corte y bisel en tubería flexible	Unit	6	\$81	\$470.015	\$	\$ 2.820.090,25
	Desarrollado y tendido de tubería flexible	ml	2400	\$9	\$49.158	\$	\$ 117.981.990,86
Construcción de línea flujo flexible	Realización de empalmes (mid line and end fitting uno por lado)	Unit	6	\$2.887	\$16.652.240	\$	\$ 99.913.439,65
	Acompañamiento tecnico en pruebas y tendido	Days	18	\$1.372	\$7.912.850	\$	\$ 142.431.293,26
Servicios de ensamble eléctrico	Protección catodica	Km	0	\$17.500	#DIV/0!	\$	\$ -
Servicios de Adecuación y Obras civiles	Adecuaciones y movimientos de tierra	Km	2,4	\$49.583	\$285.952.146	\$	\$ 686.285.151,09
Servicios de transporte e izaje	Transporte Carga Seca (Materiales, equipos, gruas, etc)	Unidad	1	\$10.155	\$58.962.989	\$	\$ -
Servicios de ensamble instrumentación	Trabajos de instalación de montaje de instrumentación	Global	1	\$21.000	\$121.109.144	\$	\$ -
EQUIPOS / DISPOSITIVOS PROCESO						\$ 1.009.242.869	\$ 1.285.343.575
	Control System Switch	Global	1	\$20.000	\$115.342.042	\$	\$ -
Instrumentación para control y automatización	Instrumentación y/o valvulas de control	Global	1	\$35.000	\$201.848.574	\$	\$ 201.848.573,85
	Accesorios de conexionado de tubería	Global	1	\$40.000	\$230.684.084	\$	\$ -
	Tubería de 6 pulgadas, X42 Sch 40 3LPP	ml	2658	\$84	\$483.575	\$	\$ 1.285.343.574,82
Materiales de Conexionado y Tubería	Manifolds 4300	Unidad	1	\$30.000	\$173.013.063	\$	\$ -
	Trampas para marranos ANSI 300#	Unidad	2	\$25.000	\$144.177.553	\$	\$ 288.355.105,50
SOCIAL AMBIENTAL Y SEGURIDAD						\$ 461.368.169	\$ 492.480.167
Social	Gastos sociales relacionamiento y socialización	Global	1	\$40.000	\$230.684.084	\$	\$ 230.684.084,40
Seguridad Física	Aseguramiento y logistica seguridad fisica	Global	1	\$10.000	\$57.671.021	\$	\$ 57.671.021,10
Negociación de tierras	Land negotiation	Ha	2,1	\$11.942	\$68.294.630	\$	\$ 143.418.723,53
Estudios y permisos ambientales	Land Permits & Fences	Global	1	\$10.526	\$60.706.338	\$	\$ 60.706.338,00
	Plan de Manejo Ambiental	Global	1	\$80.000	\$461.368.169	\$	\$ -
Subtotal						\$ 1.816.375.712	\$ 3.191.736.560
Impuestos		19%				\$	\$ 345.111.385
Costos Administrativos		5,0%				\$	\$ 90.818.786
Cargos bancarios		4%/1000				\$	\$ 7.265.503
Subtotal Final						\$ 2.299.571.396	\$ 3.970.520.281
Contingencia		2%				\$	\$ 38.327.514
TOTAL						\$ 2.295.898.900	\$ 4.034.355.012
						2,4	\$ 6.330.253.912
						5	\$ 10.700.805.175
						10	\$ 19.105.711.451
						20	\$ 35.915.524.002

Longitud (km)

Nota. Tabla tomada del anexo 3, presupuesto líneas de flujo.

Presupuesto total para el caso 2: COP6.330.253.912, con valores corrientes al 2023.

7.4.2 Evaluación comparativa de alternativas

Luego de consolidar los costos asociados para ambos casos, se procede a clasificarlos por actividad principal (categoría), a fin de analizar las variaciones considerables que se encuentran por tipo de tecnología constructiva (tabla 5 y gráfica 3).

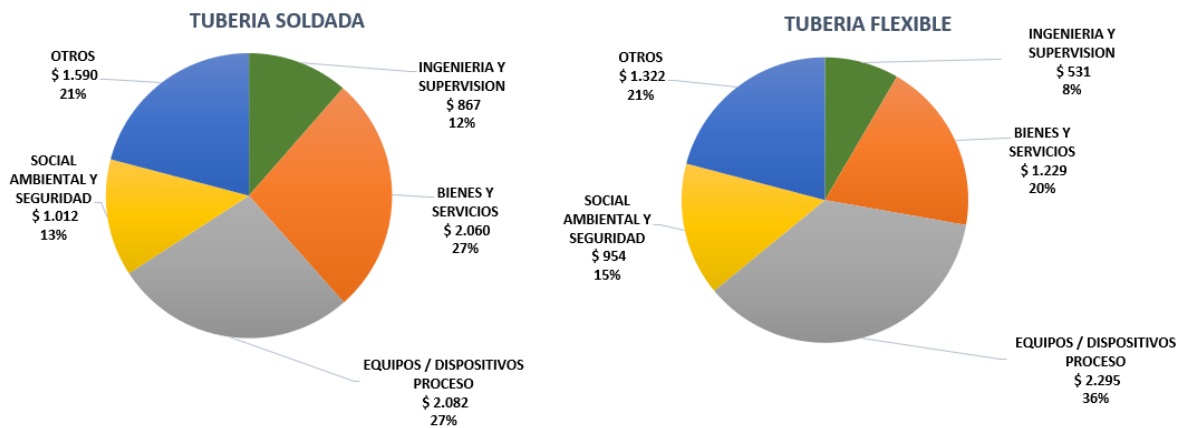
Tabla 5

Comparativo por categoría

ITEM	TUBERIA SOLDADA			TUBERIA FLEXIBLE		
	VALOR FIJO	VALOR VARIABLE	TOTAL	VALOR FIJO	VALOR VARIABLE	TOTAL
INGENIERIA Y SUPERVISION	\$ 166,09	\$ 701,28	\$ 867	\$ 166,09	\$ 364	\$ 531
BIENES Y SERVICIOS	\$ 190	\$ 1.870	\$ 2.060	\$ 180	\$ 1.049	\$ 1.229
EQUIPOS / DISPOSITIVOS PROCESO	\$ 1.009	\$ 1.073	\$ 2.082	\$ 1.009	\$ 1.285	\$ 2.295
SOCIAL AMBIENTAL Y SEGURIDAD	\$ 461	\$ 550	\$ 1.012	\$ 461	\$ 492	\$ 954
OTROS	\$ 482	\$ 1.107	\$ 1.590	\$ 480	\$ 843	\$ 1.322
TOTAL (Millones de COP)	\$2.309	\$5.301	\$7.611	\$2.296	\$4.034	\$6.330
Distribución Fijo Variable	30%	70%		36%	64%	

Gráfica 3

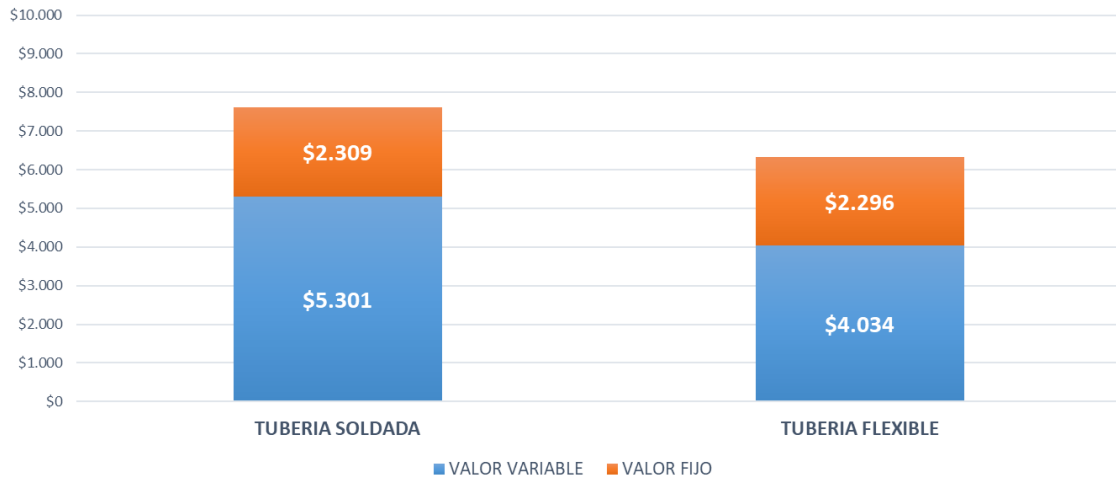
Comparativo por categoría



Comparando los dos casos, se puede evidenciar que el costo total del proyecto con tubería flexible es un 17% más económico en comparación con la opción utilizando tubería soldada. Cuando se tiene en cuenta solo la categoría de materiales y equipos es un 10% más costoso en el proyecto con tubería flexible. Esto se debe a que las principales ventajas de la tubería flexible están relacionadas con la agilidad en la instalación, lo que permite reducir significativamente los costos asociados a mano de obra y servicios complementarios (gráfica 4).

Gráfica 4

Costos fijos versus costos variables según tecnología utilizada



Al clasificar los costos presupuestados en componentes fijos y variables, se puede observar que, en el caso con tubería soldada, el 70% de los costos pueden clasificarse como variables; sin embargo, en el caso con tuberías flexibles, este porcentaje es ligeramente inferior, casi un 64%, debido principalmente a los menores costos de mano de obra en comparación con los costos fijos, los cuales presentan variaciones mínimas en ambos casos.

Además de la consolidación de los presupuestos asociados para ambas tecnologías constructivas, se realiza una estimación presupuestal de costos para casa uno de los casos, en longitudes de 2,4 kilómetros, 5 kilómetros, 10 kilómetros y 20 kilómetros, con el objetivo de evaluar la eficiencia que se puede lograr en longitudes superiores utilizando tubería flexible, en comparación con la construcción convencional soldada (tabla 6 y gráfica 5).

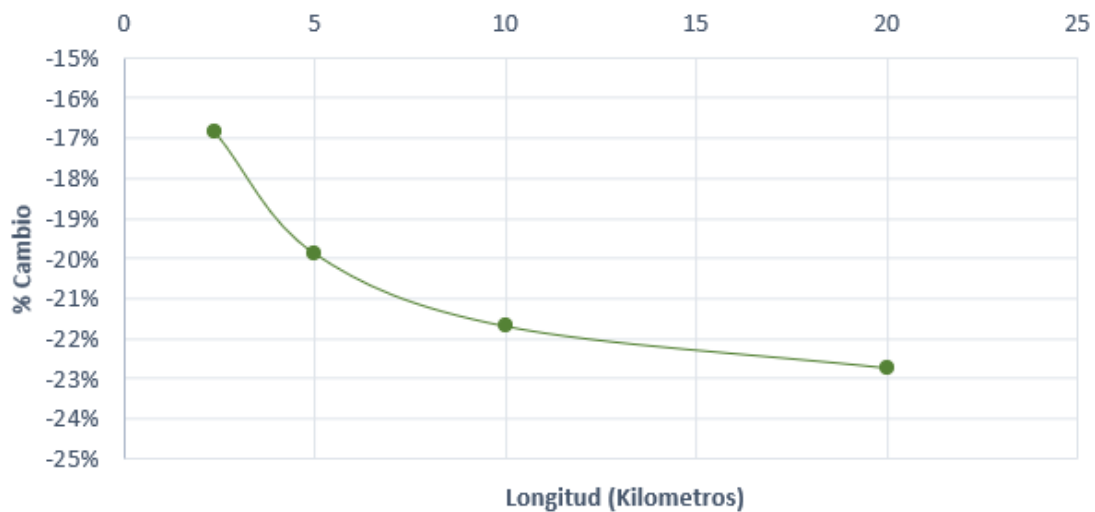
Tabla 6

Comparativo en precio variando longitud

LONGITUD	TUBERIA SOLDADA	TUBERIA FLEXIBLE	SOLDADA VS FLEXIBLE
2,4	\$ 7.611	\$ 6.330	-17%
5	\$ 13.354	\$ 10.701	-20%
10	\$ 24.399	\$ 19.106	-22%
20	\$ 46.488	\$ 35.916	-23%

Gráfica 5

Variabilidad del presupuesto con tubería flexible versus soldada, según longitud



Lo anterior permite evidenciar cómo, con la tubería soldada, a medida que se requieren mayores longitudes resulta más eficiente, o con una diferencia menor, el hecho de instalar sistemas de transporte de petróleo y(o) gas por medio de líneas de flujo en tubería flexible.

Además de tener un mejor comportamiento en cuanto a los costos finales en el caso de construcción con tubería flexible, es importante hacer un análisis comparativo de los tiempos de la ruta crítica de cada una de las tecnologías constructivas, asumiendo una construcción de línea de flujo de 2,4 kilómetros en ambos casos.

En el caso de la tubería soldada, se consideran tiempos promedio para cada fase constructiva, siendo relevante mencionar que el proceso de soldadura se calcula tomando en cuenta dos cuadrillas de soldadura, cada una con un rendimiento de seis juntas soldadas por día, para un total de 400 juntas requeridas. Esto implica un tiempo de soldadura de 33 días, a diferencia del tendido de la tubería flexible, que, por su configuración, permite realizar la instalación de la misma longitud de 2,4 km en nueve días (tabla 7).

Tabla 7

Ruta crítica de construcción con tubería soldada y tubería flexible

Tecnología Constructiva	Preparativos	Excavación	Soldadura / Instalacion	Conexionado y pruebas	Protección Catodica	Obras Geotecnia	Total (Meses)	Total (Dia)
Soldado	30	10	33	8	10	15	3,5	106
Flexible	8	3	9	8	0	15	1,4	43
							<i>Diferencia</i>	63

Finalmente, existe una diferencia aproximada de 63 días con respecto a la construcción con tubería flexible. Esta diferencia, en el caso de habilitar el transporte de aproximadamente 4000 barriles de fluido, genera beneficios económicos adicionales, ya sea a través de una reducción en los costos de tratamiento, transporte o producción, en el mejor de los casos.

7.4.3 Análisis de sensibilidad a variables tiempo y flujo transportado

Para efectos de evaluar los impactos económicos que pueden derivar de la implementación de la tubería flexible, se inicia con la determinación de un flujo de ejecución de costos mensual para cada una de las alternativas evaluadas. Como se indicó anteriormente, para la construcción de 2,4 kilómetros de línea de flujo en tubería soldada se estima un tiempo total de ejecución del proyecto de 3,5 meses, y para el caso de tubería flexible, de 1,5 meses. Con este tiempo obtenido se plantean los flujos de ejecución de costos que se describen a continuación.

Para elaborar el flujo de ejecución de costos, de acuerdo con las etapas del proyecto, se divide en las siguientes categorías: ingeniería y supervisión, bienes y servicios, equipos/dispositivos proceso, social ambiental y seguridad. Cada categoría incluye las actividades por desarrollar que se describen a continuación.

- **Ingeniería y supervisión.** Diseños e ingeniería, supervisión (gastos mantenimiento y administrativos), supervisión técnica y administrativa, servicios de localización y replanteo, transportes aéreos o terrestres.
- **Bienes y servicios.** Construcción de línea flujo flexible, servicios de ensamblaje eléctrico, servicios de adecuación y obras civiles, servicios de transporte e izaje, servicios de ensamblaje instrumentación.

- **Equipos/dispositivos proceso.** Instrumentación para control y automatización, materiales de conexionado y tubería
- **Social ambiental y seguridad.** Social, seguridad física, negociación de tierras, estudios y permisos ambientales.

6.4.3.1. Caso 1. Sistema de construcción convencional en tubería soldada (tabla 8)

Tabla 8

Flujo de ejecución de costos tubería soldada (MMCOP)

CATEGORIA	Flujo de ejecución de Costos - Tubería Soldada (MMCOP)				
	MES 0	MES 1	MES 2	MES 3	MES 4
INGENIERIA Y SUPERVISION					
Diseños e Ingeniería	\$ 166,1				
Supervisión		\$ 28,8	\$ 28,8	\$ 28,8	\$ 28,8
Supervisión		\$ 100,3	\$ 100,3	\$ 100,3	\$ 100,3
Servicios de localización y replanteo		\$ 28,8	\$ 28,8	\$ 28,8	\$ 28,8
Transportes Aereos o Terrestres		\$ 17,3	\$ 17,3	\$ 17,3	\$ 17,3
BIENES Y SERVICIOS					
Construcción de línea flujo soldada y ensamblada		\$ 135,0	\$ 135,0	\$ 135,0	\$ 135,0
Servicios de ensamblaje eléctrico		\$ 100,3	\$ 100,3	\$ 100,3	\$ 100,3
Servicios de Adecuación y Obras civiles		\$ 60,6	\$ 60,6	\$ 60,6	\$ 60,6
Servicios de transporte e izaje	\$ 69,2				
Servicios de ensamblaje instrumentación	\$ 121,1				
EQUIPOS / DISPOSITIVOS PROCESO					
Instrumentación para control y automatización	\$ 115,3				
	\$ 201,8				
	\$ 230,7				
Materiales de Conexionado y Tubería		\$ 1.073,0			
	\$ 173,0				
	\$ 288,4				
SOCIAL AMBIENTAL Y SEGURIDAD					
Social		\$ 57,7	\$ 57,7	\$ 57,7	\$ 57,7
Seguridad Física		\$ 28,8	\$ 28,8	\$ 28,8	\$ 28,8
Negociación de tierras	\$ 143,4				
	\$ 60,7				
Estudios y permisos ambientales	\$ 461,4				
Subtotal	\$ 2.031,1	\$ 1.802,3	\$ 729,3	\$ 729,3	\$ 729,3
Impuestos	\$ 386	\$ 342	\$ 139	\$ 139	\$ 139
Costos Administrativos	\$ 102	\$ 90	\$ 36	\$ 36	\$ 36
Cargos bancarios	\$ 8,12	\$ 7,21	\$ 2,92	\$ 2,92	\$ 2,92
Subtotal Final	\$ 2.526,7	\$ 2.242,0	\$ 907,2	\$ 907,2	\$ 907,2
Contingencia	\$ 41	\$ 36	\$ 15	\$ 15	\$ 15
TOTAL	\$ 2.567	\$ 2.278	\$ 922	\$ 922	\$ 922

6.4.3.2. Caso 2. Sistema de construcción en tubería flexible (tabla

9)

Tabla 9

Flujo de ejecución de costos tubería flexible (MMCOP)

		Flujo de ejecución de Costos - Tubería Flexible (MMCOP)		
CATEGORIA		MES 0	MES 1	MES 2
INGENIERIA Y SUPERVISION				
Diseños e Ingeniería	\$	166,1		
Supervisión			\$ 21,6	\$ 21,6
Supervisión			\$ 75,3	\$ 75,3
Servicios de localización y replanteo			\$ 57,7	\$ 57,7
Transportes Aéreos o Terrestres			\$ 27,7	\$ 27,7
BIENES Y SERVICIOS				
			\$ 1,4	\$ 1,4
Construcción de línea flujo flexible			\$ 59,0	\$ 59,0
			\$ 50,0	\$ 50,0
			\$ 71,2	\$ 71,2
Servicios de ensamblaje eléctrico				
Servicios de Adecuación y Obras civiles			\$ 686,3	
Servicios de transporte e izaje	\$	58,6		
Servicios de ensamblaje instrumentación	\$	121,1		
EQUIPOS / DISPOSITIVOS PROCESO				
Instrumentación para control y automatización	\$	115,3		
	\$	201,8		
	\$	230,7		
Materiales de Conexión y Tubería			\$ 1.285	
	\$	173,0		
	\$	288,4		
SOCIAL AMBIENTAL Y SEGURIDAD				
Social			\$ 115,3	\$ 115,3
Seguridad Física			\$ 28,8	\$ 28,8
Negociación de tierras	\$	143,4		
	\$	60,7		
Estudios y permisos ambientales	\$	461,4		
Subtotal	\$	2.020,5	\$ 2.479,6	\$ 508,0
Impuestos	\$	383,9	\$ 471,1	\$ 96,5
Costos Administrativos	\$	101,0	\$ 124,0	\$ 25,4
Cargos bancarios	\$	8,1	\$ 9,9	\$ 2,0
Subtotal Final	\$	2.514	\$ 3.085	\$ 632
Contingencia	\$	40,4	\$ 49,6	\$ 10,2
TOTAL	\$	2.553,9	\$ 3.134,2	\$ 642,1

La implementación de proyectos en tubería flexible se destaca por anticipar la disponibilidad de infraestructura de transporte ante requerimientos operativos. Por lo tanto, para efectos de comparar económicamente los beneficios económicos de su implementación, se plantean las siguientes premisas para su análisis:

- *Precio Barril Brent Mínimo 2023: 70 USD/Barril.* Tomado de valores históricos entre 1 de enero 2023 y 30 de junio del mismo año (Investing.com, s. f.)
- *Costo de levantamiento/extracción: 7 USD/Barril*
- *Costo de transporte a punto de exportación: 8 USD/Barril.* Tomado de valores reportados por la ANH de promedios históricos.
- *TRM COP4500*
- *Tasa de descuento (anual): 10%*

Tasa de descuento (mensual): 0,8%. La tasa de descuento es usualmente utilizada para evaluar proyectos de inversión, e indica el valor del dinero ahora que se recibiría en una fecha posterior. Según la Resolución CREG 081 de 2021, que establece la tasa de descuento a corte del 31 de julio de 2021, la tasa de descuento en pesos constantes (real) y antes de impuestos es de 10,94% (CREG, 2021). Según la metodología Harberger, la tasa de descuento recomendada en Colombia es del 9% (Piraquive y otros, 2018). Teniendo en cuenta los dos valores de tasa de descuento, se obtiene un promedio para establecer la tasa de descuento anual utilizada para los siguientes cálculos.

Finalmente, el costo de oportunidad por unidad producida que se habilita para comercialización se calcula tomando el costo de venta final, descontándole tanto los costos de producción, levantamiento y extracción como el costo de transporte desde el campo en producción hasta el punto de exportación y(o) refinación. Este costo de oportunidad se calcula en 55 USD/Barril.

El flujo de caja para evaluar las dos alternativas de construcción de líneas de flujo se proyecta a cuatro meses, teniendo en cuenta que los beneficios se generan en el corto plazo al permitir reducción del tiempo de habilitación de producción comercializada.

Para el análisis, se considera una producción promedio transportada de 1000 barriles de petróleo por día (tabla 10).

Tabla 10

Análisis de valor presente neto (VPN)

Flujo de Caja - Alternativa Actual	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Dias					15
Gastos/Inversiones	\$ 2.567	\$ 2.278	\$ 922	\$ 922	\$ 922
Total Salidas	\$ 2.567	\$ 2.278	\$ 922	\$ 922	\$ 922
Producción Diaria					1000
Ingresos					\$ 3.713
Total Entradas	\$ -	\$ -	\$ -	\$ -	\$ 3.713
Flujo Mensual	-\$ 2.567	-\$ 2.278	-\$ 922	-\$ 922	\$ 2.791
VPN - Alternativa Actual	-\$ 3.900				
Flujo de Caja - Alternativa Flexible	Mes 0	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4
Dias			15	30	30
Gastos	\$ 2.553,9	\$ 3.134,2	\$ 642,1	\$ -	\$ -
Total Salidas	\$ 2.553,9	\$ 3.134,2	\$ 642,1	\$ -	\$ -
Producción Diaria			1000	1000	1000
Ingresos			\$ 3.713	\$ 7.425	\$ 7.425
Total Entradas	\$ -	\$ -	\$ 3.713	\$ 7.425	\$ 7.425
Flujo Mensual	-\$ 2.553,9	-\$ 3.134,2	\$ 3.070,4	\$ 7.425,0	\$ 7.425,0
VPN - Alternativa Flexible	\$ 11.708				

En el flujo de caja, para el caso de *alternativa actual*, se consideran 15 días en el mes 4. Para el caso de *alternativa flexible*, en el mes 2, se consideran 15 días, y en los meses 3 y 4 se tiene en cuenta 30 días para cada mes, por lo mencionado anteriormente respecto al tiempo de ejecución para cada caso.

Los gastos/inversiones se obtienen según el flujo de ejecución de costos para cada caso. Estos gastos/inversiones se denominan *total salidas*. Los ingresos se obtienen de la multiplicación de la producción diaria por el costo de oportunidad por los días efectivos (ya finalizado el proyecto) que se está considerando según la alternativa por la TRM tomada. Estos ingresos se denominan *total entradas*. Por tanto, el flujo mensual se obtiene de la diferencia entre el *total entradas* menos el *total salidas*.

Para cada caso, se determina el valor presente neto del flujo de inversiones y gastos sobre los beneficios obtenidos por producción de hidrocarburos. Lo anterior, en aras de validar, para un mismo período de evaluación, el beneficio de anticipar producción por efectos de contar con una tubería flexible como infraestructura de transporte.

Finalmente, se determina la sensibilidad de cada una de las tecnologías al cambio de producción transportada, evaluando el comportamiento del valor presente neto para flujos de 100 barriles de petróleo por día, hasta la capacidad máxima de transporte de 4000 barriles por día (tabla 11).

Tabla 11

Análisis de sensibilidad

Análisis de Sensibilidad a la Producción Transportada	100	200	500	1000	2000	3000	4000
VPN - Alternativa Actual	- 7.111 -	6.755 -	5.684 -	3.900 -	332	3.236	6.804
VPN - Alternativa Flexible	- 4.450 -	2.655	2.731	11.708	29.662	47.616	65.570

De igual manera, se construye el análisis de sensibilidad, para validar que los cambios de TRM y de precio del crudo no son tan determinantes como sí lo pueden ser los cambios en producción por día a transportar, tanto en la alternativa de construcción con tubería convencional como en la alternativa de tubería flexible. Asimismo, lo que se confirma es que el hecho de contar con tubería flexible puede permitir convertir las alternativas en proyectos viables económicamente con VPN positivo, incluso con un 12,5% de la producción esperada que esté siendo transportada; es decir, con 500 barriles de petróleo por día.

A continuación, se presentan los diferentes modelos de sensibilidad analizados, con variación de las tres variables independientes definidas. Se presentan tres casos, modificando la TRM a COP3900 (tabla 12), COP4500 (tabla 13) y COP4900 (tabla 14), para obtener el VPN variando la producción promedio transportada de barriles de petróleo por día (eje X) y el precio del barril Brent (eje Y).

Tabla 12

Análisis de sensibilidad. Caso TRM 3900

VPN - Alternativa Actual		100	200	500	1000	2000	3000	4000
- \$	159							
	60	-7215	-6962	-6203	-4938	-2408	122	2652
	70	-7159	-6850	-5922	-4376	-1284	1809	4901
	80	-7103	-6737	-5641	-3814	-159	3495	7150
	90	-7046	-6625	-5360	-3251	965	5182	9399
	100	-6990	-6512	-5079	-2689	2090	6869	11647
VPN - Alternativa Flexible								
\$	30.533							
	60	4.972	3.699	120	6.485	19.216	31.947	44.678
	70	4.690	3.134	1.534	9.314	24.874	40.434	55.994
	80	4.407	2.568	2.949	12.144	30.533	48.922	67.311
	90	4.124	2.002	4.364	14.973	36.191	57.409	78.627
	100	3.841	1.436	5.778	17.802	41.849	65.896	89.943

Tabla 13

Análisis de sensibilidad. Caso TRM 4500

VPN - Alternativa Actual		100	200	500	1000	2000	3000	4000
\$	965							
	60	-7176	-6884	-6009	-4549	-1630	1290	4209
	70	-7111	-6755	-5684	-3900	-332	3236	6804
	80	-7046	-6625	-5360	-3251	965	5182	9399
	90	-6982	-6495	-5035	-2603	2263	7128	11993
	100	-6917	-6365	-4711	-1954	3560	9074	14588
VPN - Alternativa Flexible								
\$	36.191							
	60	4.777	3.308	1.099	8.444	23.133	37.823	52.512
	70	4.450	2.655	2.731	11.708	29.662	47.616	65.570
	80	4.124	2.002	4.364	14.973	36.191	57.409	78.627
	90	3.797	1.349	5.996	18.237	42.719	67.202	91.684
	100	3.471	696	7.628	21.501	49.248	76.995	104.742

Tabla 14

Análisis de sensibilidad. Caso TRM 4900

VPN - Alternativa Actual		100	200	500	1000	2000	3000	4000
\$	1.715							
	60	-7150	-6832	-5879	-4289	-1111	2068	5247
	70	-7080	-6691	-5526	-3583	302	4187	8072
	80	-7009	-6550	-5172	-2877	1715	6306	10898
	90	-6938	-6409	-4819	-2170	3128	8425	13723
	100	-6868	-6267	-4466	-1464	4540	10545	16549
VPN - Alternativa Flexible								
\$	39.963							
	60	4.646	3.046	1.752	9.750	25.745	41.740	57.735
	70	4.291	2.336	3.529	13.304	32.854	52.404	71.953
	80	3.935	1.625	5.307	16.859	39.963	63.067	86.171
	90	3.580	914	7.084	20.413	47.072	73.731	100.389
	100	3.224	203	8.861	23.968	54.181	84.394	114.607

Dado lo anterior, se puede evidenciar cómo la implementación de tubería flexible, además de tener inversiones menores, permite obtener beneficios en términos de anticipación de ingresos por comercialización de hidrocarburos con menor riesgo de inversión, en el caso de contar con bajos flujos finales de transporte.

7.4.4 Análisis de tornado

Con el análisis de tornado, se plantea definir cuál es la variable que mayor impacto tiene sobre el resultado del VPN.

En principio, se plantea la definición de variables independientes que determinarán el comportamiento del modelo económico. Para este proceso, se definen como variables críticas independientes la producción diaria esperada, el precio del barril Brent y la tasa representativa del mercado.

Frente a la producción diaria de petróleo que se espera transportar por el oleoducto, se ha tomado una base mínima de 100 barriles de petróleo por día, y como valor máximo se asume la capacidad máxima de transporte definida en el capítulo técnico.

Para las variables del precio del crudo Brent y TRM, se asigna una distribución normal de probabilidad, dados los históricos considerados para el análisis.

Para el precio del crudo se toman los valores históricos entre el 1 de enero de 2019 y el 31 de julio de 2023, a los cuales se les asigna la distribución de probabilidad normal, encontrando que la probabilidad de que el precio del crudo sea menor a 50 USD/Barril es del 0,16, y de que sea mayor de 90 USD/Barril, es del 0,18. Así las cosas, se definen como límites dentro del modelo de Oracle Crystal Ball®, 60 USD/Barril como límite inferior, y 100 USD/Barril como límite superior y máximo de análisis (tabla 15).

Tabla 15

Distribución normal de probabilidad para precios del crudo

Media Poblacional (μ)	\$	70,6						
Desviación Estandar (σ)	\$	20,8						
$Z < (X - \mu) / \sigma$								
X (Precio del Crudo) =		50	60	70	80	90	100	110
Z =		-0,99	-0,51	-0,03	0,45	0,93	1,41	1,89
P (X <)		0,16	0,31	0,49	0,67	0,82	0,92	0,97
P (X >)		0,84	0,69	0,51	0,33	0,18	0,08	0,03

Para la tasa representativa del mercado (TRM), se toman valores históricos entre el 1 de enero de 2021 y el 31 de julio de 2023, y sobre estos registros se asigna la distribución de probabilidad normal (tabla 16).

Tabla 16

Distribución normal de probabilidad para TRM

Media Poblacional (μ)	\$	4.116
Desviación Estandar (σ)	\$	427

Luego de tener las variables independientes definidas en el modelo económico para determinar el VPN en ambos escenarios de análisis, se utiliza la herramienta Oracle Crystal Ball® para establecer mediante un diagrama de tornado la variable que determina el comportamiento de ese VPN en ambos casos (tabla 17).

Tabla 17

Variables de entrada para gráfico tipo araña y diagrama de tornado

Variable de entrada	Entrada		
	Hacia abajo	Hacia arriba	Caso base
Produccion Petroleo	100,00	4.000,00	2.000,00
Precio Barril	56,51	84,76	70,63
TRM	3.292,84	4.939,27	4.116,05
Costo de Transporte a punto de exportación	6,40	9,60	8,00
Costo de Levantamiento/Extracción	5,60	8,40	7,00

En el gráfico tipo araña y el diagrama de tornado, obtenido a través de la herramienta Oracle Crystal Ball®, se evidencian las desviaciones porcentuales para cada una de las variables independientes y su efecto sobre el VPN final. Las variables de entrada (5 puntos de prueba) para analizar son las que se presentan en la tabla 17.

- **Producción petróleo.** Se toma como producción mínima 100 barriles de petróleo diario (hacia abajo) y como producción máxima 4000 barriles de petróleo diario (hacia arriba).

- **Precio barril.** De acuerdo con los valores históricos entre el 1 de enero de 2019 y el 31 de julio de 2023, se toma la media poblacional (μ) – desviación estándar (σ), donde el caso base es la media poblacional. El rango de prueba esta entre -20% y 20% (datos tomados para hacia abajo y hacia arriba, respectivamente).
- **TRM.** De acuerdo con los valores históricos entre el 1 de enero de 2021 y el 31 de julio de 2023, se toma la media poblacional (μ) – desviación estándar (σ), donde el caso base es la media poblacional. El rango de prueba está situado entre -20% y 20% (datos tomados para hacia abajo y hacia arriba, respectivamente).
- **Costo de transporte a punto de exportación.** Se toma como caso base el valor tomado de valores reportados por la ANH de promedios históricos (8 USD/Barril). El rango de prueba está entre -20% y 20% (datos tomados para hacia abajo y hacia arriba, respectivamente).
- **Costo de levantamiento/extracción.** Se toma como caso base el valor tomado de valores reportados por la ANH de promedios históricos (7 USD/Barril). El rango de prueba esta entre -20% a 20% (datos tomados para hacia abajo y hacia arriba, respectivamente).

6.4.4.2. Caso 1. Sistema de construcción convencional en tubería soldada (tablas 18 y 19 y gráficas 6 y 7)

Tabla 18

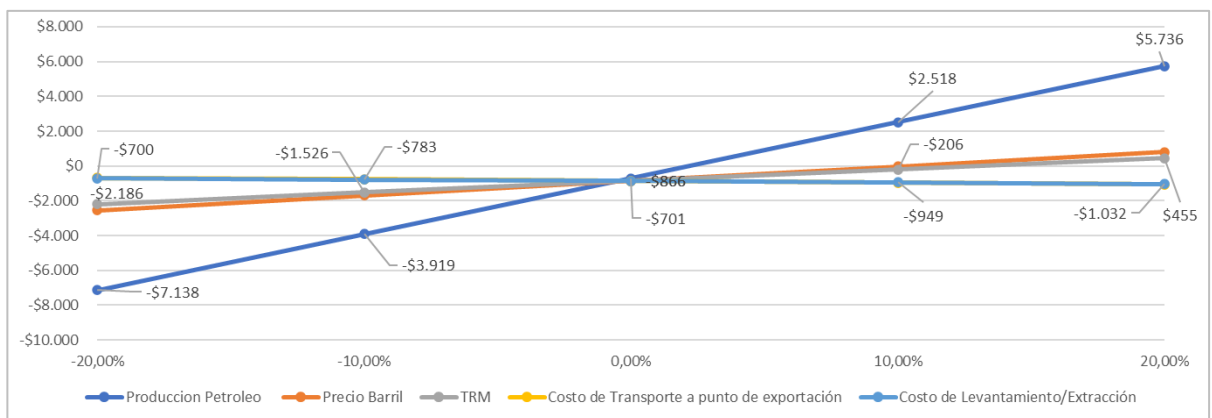
Datos de variación porcentual de variables independientes caso 1. VPN alternativa actual soldada

Variable de entrada	Elasticidad ¹	R318				
		-20,00%	-10,00%	0,00%	10,00%	20,00%
Produccion Petroleo	2,65	-\$7.138	-\$3.919	-\$701	\$2.518	\$5.736
Precio Barril	13,06	-\$2.542	-\$1.704	-\$866	-\$28	\$811
TRM	11,05	-\$2.186	-\$1.526	-\$866	-\$206	\$455
Costo de Transporte a punto de exportación	-1,10	-\$676	-\$771	-\$866	-\$961	-\$1.056
Costo de Levantamiento/Extracción	-0,96	-\$700	-\$783	-\$866	-\$949	-\$1.032

¹La elasticidad1 es la media de todo el rango de prueba

Gráfica 6

Gráfico tipo araña. Alternativa actual soldada



Gráfica 7

Diagrama de tornado. Alternativa actual soldada

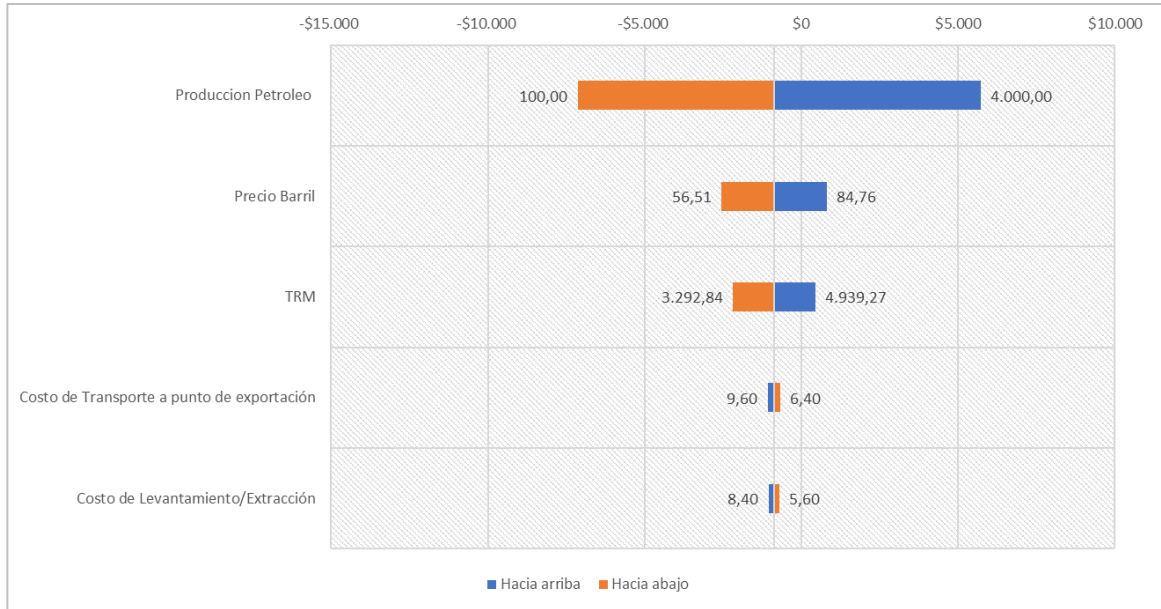


Tabla 19

Datos de variación porcentual de variables independientes. Caso 1. Alternativa actual soldada

Variable de entrada	R318				Entrada		
	Hacia abajo	Hacia arriba	Rango	Explicación de variación ¹	Hacia abajo	Hacia arriba	Caso base
Produccion Petroleo	-\$7.138	\$5.736	\$12.874	89,97%	100,00	4.000,00	2.000,00
Precio Barril	-\$2.542	\$811	\$3.353	96,08%	56,51	84,76	70,63
TRM	-\$2.186	\$455	\$2.641	99,86%	3.292,84	4.939,27	4.116,05
Costo de Transporte a punto de exportación	-\$676	-\$1.056	\$380	99,94%	6,40	9,60	8,00
Costo de Levantamiento/Extracción	-\$700	-\$1.032	\$332	100,00%	5,60	8,40	7,00

¹La explicación de la variación 1 es acumulativa

6.4.4.3. Caso 2. Sistema de construcción en tubería flexible (gráficas 8 y

9 y tablas 20 y 21)

Gráfica 8

Gráfico tipo araña. Alternativa flexible

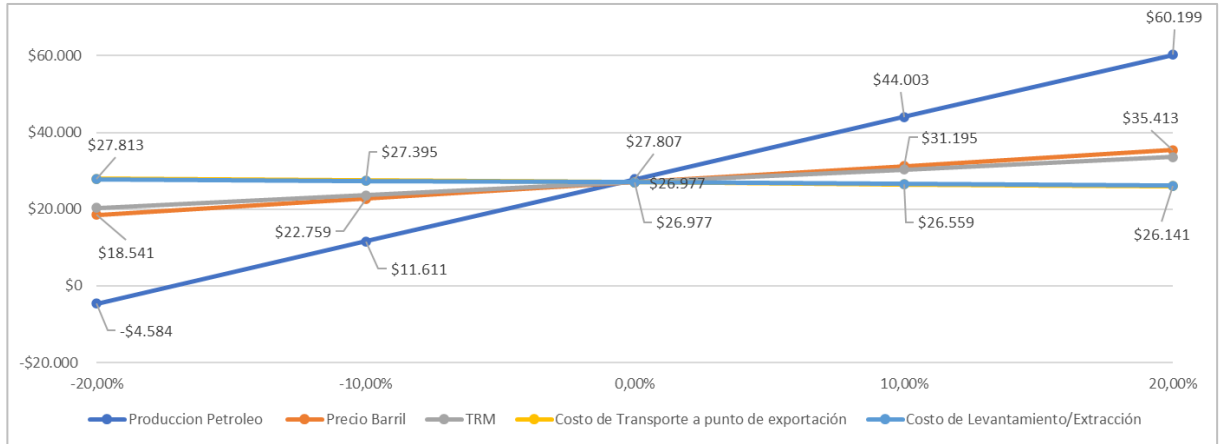


Tabla 20

Datos de variación porcentual de variables independientes. Caso 2. Alternativa flexible

Variable de entrada	Elasticidad ¹	R328				
		-20,00%	-10,00%	0,00%	10,00%	20,00%
Producción Petróleo	1,20	-\$4.584	\$11.611	\$27.807	\$44.003	\$60.199
Precio Barril	1,58	\$18.541	\$22.759	\$26.977	\$31.195	\$35.413
TRM	1,24	\$20.332	\$23.655	\$26.977	\$30.299	\$33.621
Costo de Transporte a punto de exportación	-0,18	\$27.932	\$27.455	\$26.977	\$26.499	\$26.021
Costo de Levantamiento/Extracción	-0,16	\$27.813	\$27.395	\$26.977	\$26.559	\$26.141

¹La elasticidad1 es la media de todo el rango de prueba

Gráfica 9

Diagrama de tornado. Alternativa flexible

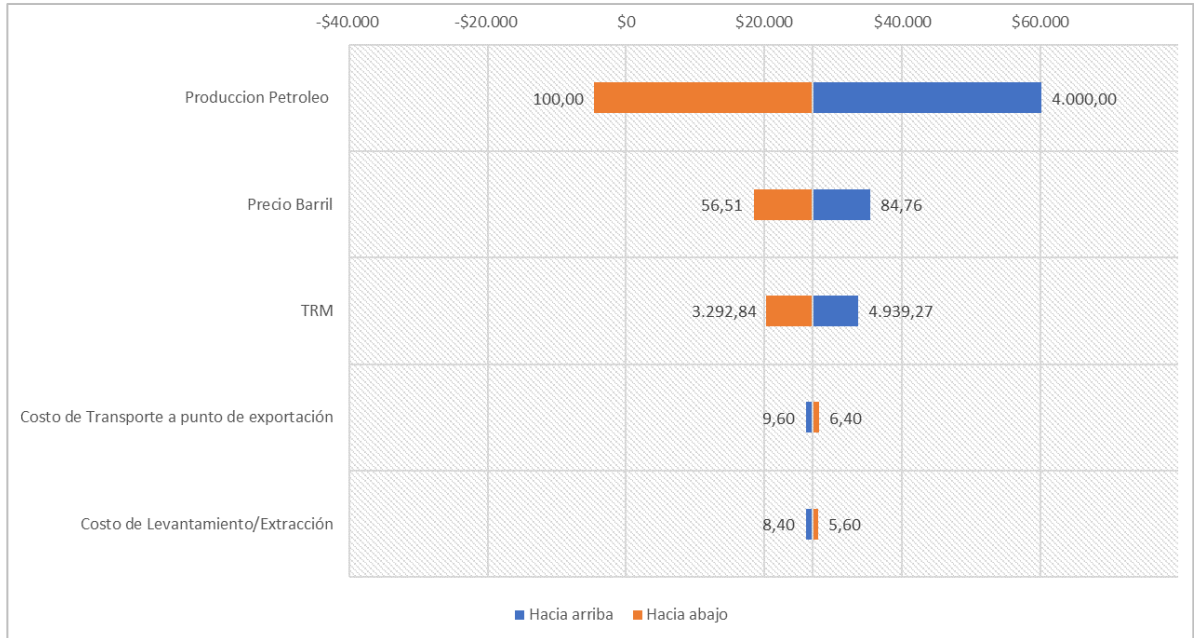


Tabla 21

Datos de variación porcentual de variables independientes. Caso 2. Alternativa flexible

Variable de entrada	R328				Entrada		
	Hacia abajo	Hacia arriba	Rango	Explicación de variación ¹	Hacia abajo	Hacia arriba	Caso base
Produccion Petroleo	-\$4.584	\$60.199	\$64.784	89,97%	100,00	4.000,00	2.000,00
Precio Barril	\$18.541	\$35.413	\$16.872	96,08%	56,51	84,76	70,63
TRM	\$20.332	\$33.621	\$13.289	99,86%	3.292,84	4.939,27	4.116,05
Costo de Transporte a punto de exportación	\$27.932	\$26.021	\$1.911	99,94%	6,40	9,60	8,00
Costo de Levantamiento/Extracción	\$27.813	\$26.141	\$1.672	100,00%	5,60	8,40	7,00

¹La explicación de la variación 1 es acumulativa

Las tablas 20 y 21 muestran los datos obtenidos en el rango de prueba para los puntos de prueba o variables de entrada.

En los gráficos tipo araña, se puede evidenciar que la curva con mayor pendiente es la producción de petróleo diario para transportar, tanto para el caso 1, sistema de construcción convencional en tubería soldada, como para el caso 2, sistema de construcción en tubería flexible, lo que significa que es la variable que más impacta en el VPN. El costo de levantamiento/extracción es la variable que menos impacta en el valor del VPN.

En los diagramas de tornado se continúa evidenciando que la producción de petróleo diaria para transportar es la variable que más impacta en el VPN, explicando el comportamiento final del VPN en casi un 89,97%. El costo de levantamiento/extracción es la variable que menos impacta en el valor del VPN.

8. CONCLUSIONES

Después de realizar los anteriores estudios, se puede concluir que el método de construcción de líneas de flujo con tubería flexible es más ventajoso tanto desde el punto de vista técnico como económico, en comparación con los métodos constructivos convencionales, como utilizando la tubería soldada. Esto es válido para proyectos de infraestructura de transporte de hidrocarburos en regiones como el departamento de Arauca. Un factor adicional que respalda esta afirmación es el tiempo de construcción requerido.

Cuando se desarrollan proyectos en zonas de alto riesgo por situaciones de conflicto armado, al reducirse el tiempo de construcción hasta en más del 60% respecto al requerido por los métodos convencionales, se logra mitigar los riesgos de seguridad física para las comunidades, los empleados y los contratistas.

En el caso de un proyecto de 2,4 kilómetros de longitud usando tubería de 6 pulgadas, la construcción con tubería flexible resultó ser un 17% más económica en comparación con el costo de construir la misma línea de flujo con tubería soldada; además, el tiempo de construcción se redujo en un 60%, al pasar de 106 a 43 días.

Al consolidar los presupuestos, se observa que la construcción de líneas de flujo con tubería flexible resulta más costosa en términos de materiales, ya que la eficiencia en el costo final se logra mediante la reducción de los costos por mano de

obra en los tiempos requeridos, lo que compensa los mayores costos de adquisición y disponibilidad de la tubería flexible.

En el ámbito presupuestal, se determina que la construcción con tubería flexible tiene un componente de costo variable menor, al pasar de 70% en proyectos de tubería soldada, a casi 65% con tubería flexible. Esto indica que en longitudes mayores se maximiza la eficiencia de este método, al pasar de ser un 17% más económico, a ser casi un 22% más económico en el caso de una línea de flujo de 20 kilómetros de longitud. Lo anterior, frente a la estimación de costos fijos y variables de la construcción de tubería soldada convencional.

Para la industria de hidrocarburos, cada día que se pueda lograr adelantar un proyecto puede ser determinante para habilitar producción de hidrocarburos y, por ende, el flujo de caja de un proyecto de exploración y producción. Considerando esto, los resultados obtenidos representan una oportunidad significativa, ya que se logra hacer un ahorro considerable en tiempo, sin incurrir en mayores costos de inversión y(o) de mantenimiento.

Luego de realizado el análisis de sensibilidad a diferentes tasas de flujo, se encuentra que la tubería flexible, además de anticipar un flujo de ingresos por comercialización, permite reducir el riesgo de inversión en caso de transportar menores flujos frente a los estimados en el diseño inicial, lo cual es bastante común

en la industria de hidrocarburos cuando las tasas de producción final resultan menores a las esperadas.

La variable de la producción diaria de petróleo para transportar es la que más impacta en el VPN, en un 89,97%, establecida por medio del diagrama de tornado.

Una desventaja de la construcción de líneas de flujo con tubería flexible está relacionada con la generación de oportunidades laborales en las regiones, ya que se requiere menor cantidad de personal en un tiempo de trabajo considerablemente menor. Este aspecto puede convertirse en un riesgo social que debe abordarse y gestionarse adecuadamente en el territorio.

En resumen, es importante destacar que, mientras se avance en los trámites ambientales, arqueológicos, sociales y de ingeniería, la construcción de líneas de flujo con tubería flexible puede desarrollarse y expandirse para llegar a predominar sobre los procesos constructivos convencionales. El factor limitante para este método constructivo estaría relacionado con la disponibilidad del material a un costo proporcional en comparación con el costo del acero, ya que, si fuera considerablemente más costoso, se perderían las eficiencias logradas por el menor uso de recursos de mano de obra.

9. RECOMENDACIÓN

Como opción para los tomadores de la decisión, teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se recomienda optar por cambiar la tecnología a tubería flexible para la construcción de líneas de flujo, dado que reduce considerablemente tanto los tiempos como los costos para poner en servicio una facilidad de transporte de hidrocarburos.

En el caso de tubería flexible, se requiere menor asignación de recursos por mano de obra, lo que genera menor costo para el proyecto de la construcción de la línea de flujo, que se compensa con el mayor costo por el suministro de la tubería flexible. Esto permite que, a iguales o menores montos de inversión, se anticipe el tiempo necesario para habilitar una línea de flujo u oleoducto.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta Argote, C. (11 de mayo, 2022). Reservas probadas de crudo subieron 12% hasta llegar a 2.039 millones de barriles. *La República*. <https://www.larepublica.co/economia/las-reservas-probadas-de-crudo-subieron-12-hasta-llegar-a-2-039-millones-de-barriles-3361146>
- American National Standards Institute – ANSI (2005). *ANSI LC 1-2005/CSA 6.26-2005. Fuel Gas Piping Systems Using Corrugated Stainless Steel Tubing (CSST)*. The Author.
- American Petroleum Institute – API (July, 1998). *API 17B. Recommended practice for flexible pipe* (2nd Ed.). The Author.
- American Petroleum Institute – API (March, 2004). *Specification for Line Pipe. API 5L*. (43th ed.). API Publishing Services.
- American Petroleum Institute – API (March, 2006). *API RP 15S. Qualification of Spoolable Reinforced Plastic Line Pipe*. The Author.
- American Petroleum Institute – API (May, 2014). *API 17J. Specification for unbonded flexible pipe* (4th Ed.). The Author.
- American Petroleum Institute – API (August, 2017). *API 17K. Specification for bonded flexible pipe*. 3rd Edition, The Author.
- American Society for Testing and Materials – ASTM (2015). *Norma ASTM D380. Standard Test Methods for Rubber Hose*. The Author.

American Society for Testing and Materials – ASTM (2020). *ASTM D-2513 Standard Specification for Polyethylene (PE) Gas Pressure Pipe, Tubing and Fittings*.

The Author.

American Society for Testing and Materials – ASTM (2021). *ASTM D3350. Standard Specification for Polyethylene Plastics Pipe and Fittings Materials*. The

Author.

American Society for Testing and Materials – ASTM (2022). Standard specification for multilayer thermoplastic and flexible steel pipe and connections. *ASTM*

F2805. The Author.

Arboleda Vélez, G. (2013). *Proyectos, Identificación, formulación, evaluación y gerencia*. Colombia (2.^a ed.). Alfaomega.

Arenales, J. V. (20 de abril, 2023). Proyecciones de crecimiento económico de Colombia para este año no superan 1,5%. *La República*.

<https://www.larepublica.co/economia/proyecciones-de-crecimiento-economico-de-colombia-para-este-ano-no-superan-1-5-3596669>

Asociación Colombiana del Petróleo – ACP (2012). *Revista ACP Hidrocarburos, 02*.

Asociación Colombiana del Petróleo – ACP (2021). *Tendencias de inversión en exploración y producción (E&P) en Colombia 2020 y perspectivas 2021*.

<https://acp.com.co/web2017/es/publicaciones-e-informes/economicos/691-informe-economico-tendencias-inversion-e-p-en-colombia-2020-y-perspectivas-2021/file>

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales – ANLA (2021). *Somos ANLA*.

<https://www.anla.gov.co/nosotros/institucional/somos-anla>

- Baca Urbina, G. (1995). *Evaluación de proyectos* (3.ª ed.). McGraw-Hill.
- Banco de la República (s. f.). <http://www.banrep.gov.co/es/info-temas-a/2297>
- Banco de la República (23 de septiembre, 2019). *Boletín de Indicadores Económicos*. <https://www.banrep.gov.co/economia/pli/bie.pdf>
- Banco Mundial (26 de octubre, 2022). La depreciación monetaria aumenta el riesgo de que se intensifiquen las crisis alimentaria y energética. *Comunicado de prensa*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2022/10/26/commodity-markets-outlook>
- Banco Mundial (7 de junio, 2023a). Colombia: panorama general. *El Banco Mundial en Colombia*. <https://www.bancomundial.org/es/country/colombia/overview#:~:text=El%20PIB%20creci%C3%B3%20s%C3%B3lidamente%20a,alto%20d%C3%A9ficit%20de%20cuenta%20corriente>
- Banco Mundial (10 de enero, 2023b). La desaceleración abrupta y prolongada golpeará con fuerza a los países en desarrollo. *Comunicado de prensa*. <https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2023/01/10/global-economic-prospects>
- Behrens, W., y Hawranek, P. M. (1994). *Manual para la preparación de estudios de viabilidad industrial*. Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial, ONUDI.
- Bernal Torres, C. A. (2010). *Metodología de la investigación: administración, economía, humanidades y ciencias sociales* (3.ª ed.). Prentice Hall.
- BLS Beta Labs (s. F.). BLS Data Viewer. *Data Tools*.

- Comisión de Regulación de Energía y Gas – CREG (2021). Tasa de descuento metodología de transporte de gas natural. *Documento CREG-066*. https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/pdf/doc_creg_0066_2021.pdf
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE (2023). Información junio de 2023^{pr}. *Indicador de Seguimiento a la Economía (ISE)*. <https://www.dane.gov.co/index.php/poblacion-y-registros-vitales/nacimientos-y-defunciones/nacimientos-y-defunciones/118-demograficas/estadisticas-vitales/2863-defunciones-no-fetales-2012-preliminar>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE (abril, 2022). *Boletín Técnico – Gran Encuesta Integrada de Hogares (GEIH)*.
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística – DANE (abril, 2023). Variación anual (12 meses) del (IPC), por dicisiones de bienes y servicios / 2023 <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc/ipc-informacion-tecnica>
- FlexSteel (2017). *FlexSteel Pipe*. <https://www.flexsteelpipe.com/flexsteel-pipe.html>
- FlexSteel (July 23, 2021). TN 176 FlexSteel Technical Summary R01. *Flexsteel Technical Summary*. FlexSteel Pipeline Technologies. Unpublish document.
- FRED Economic Data (s. f.). Producer Price Index by Commodity: All Commodities (PPIACO). *Economic Research*. <https://fred.stlouisfed.org/series/PPIACO>
- Garvery, W. (2006). *Guía de soldadura para el tecnico profesional*. Limusa.

- Gerszon Mahler, D., Wu, A., Diaz-Bonilla, C., Lara Ibarra, G., y Nguyen, M. C. (4 de enero, 2023). Altos precios de la energía: ¿quiénes se ven más afectados y por qué? *Banco Mundial Blogs*.
<https://blogs.worldbank.org/es/opendata/altos-precios-de-la-energia-quienes-se-ven-mas-afectados-y-por-que>
- Guanilo-Briones, C. (2017). *Estudio de los procesos de electrofusión y termofusión en unión de tuberías de HDPE en una refinería* [tesis de Grado, Universidad de Piura]. Repositorio Institucional.
https://pirhua.udep.edu.pe/bitstream/handle/11042/3195/IME_228.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Helming S., y Göbel, M. (1998). *Planificación de proyectos orientada a objetivos (ZOPP)*. Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ)
- Icontec Internacional (17 de septiembre, 2014). Buenas practicas sociales para la exploración y la explotación de hidrocarburos. *Guía Técnica Colombiana – GTC* 250.
https://www.anh.gov.co/documents/698/GUIA_TECNICA_COLOMBIANA_-_FINAL.pdf
- Inter-American Development Bank – IADB (s. f.). Project Preparation Facilities. *About us*. <https://www.iadb.org/en/about-us/project-preparation-facilities>
- Investing.com (s. f.). Datos históricos Futuros petróleo Brent. *Futuros petróleo Brent*.
<https://es.investing.com/commodities/brent-oil-historical-data>
- ISO (2004). *ISO 15465:2004. Pipework — Stripwound metal hoses and hose assemblies*. The Author.

ISO (2005). *ISO 13628, Petroleum and Natural Gas Industries* (2nd Ed.). The Author.

ISO (2006). *ISO 18226, Plastics Pipes and Fittings – Reinforced Thermoplastics Pipe Systems for the Supply of Gaseous Fuels for Pressures up to 4 Mpa (40 bar)*. The Author.

Fuel Gas Piping Systems Using Corrugated Stainless Steel Tubing (CSST).

Lledó, P. (2009). *Director Profesional de Proyectos: cómo aprobar el PMP sin morir en el intento* (2.^a ed.). Trafford.

Riveros A. (2022). Como se transporta el petróleo en un proyecto de oil & gas.

EALDE. <https://www.ealde.es/tipos-transporte-petroleo/>

Permanent Steel Manufacturing (2022). *¿Qué es la tubería de acero al carbón?*. <https://www.permanentsteel.com/es/m/newsshow/what-is-carbon-steel-pipe.html>

Sierracol (s.f). <https://sierracolenergy.com/>

Méndez Lozano, R. A. (2006). *Formulación y evaluación de proyectos. Enfoque para emprendedores* (4.^a ed.). Ecoe.

Metal Bulletin Research (s. f.). <https://www.metalbulletinresearch.com/>

Mike (s. f.). *HDPE price index*. <https://businessanalytiq.com/procurementanalytics/index/hdpe-price-index/>

Ministerio de Comercio, Industria y Turismo (abril, 2023). *Departamento de Arauca. Perfiles económicos departamentales* [diapositivas]. PowerPoint. <https://www.mincit.gov.co/getattachment/estudios-economicos/perfiles-economicos-por-departamentos/perfiles-economicos-por-departamentos/arauca/oee-lm-perfil-departamental-del-arauca-27jul2023.pdf.aspx>

- Miranda Miranda, J. J. (2001). *Gestión de proyectos: identificación, formulación, evaluación financiera, económica, social, ambiental* (4ª. ed.). MM.
- Moreno Monsalve, N. A., Sánchez Ayala, L. M., y Velosa García, J. D. (2016). *Introducción a la Gerencia de Proyectos: Conceptos y Aplicación*. Ediciones EAN. <https://repository.universidadean.edu.co/handle/10882/9547>
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial – Onudi (s. f.). *About us*. <https://www.unido.org/>
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial – ONUDI (1978). *Manual para la preparación de estudios de viabilidad industrial*. El autor.
- Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial – ONUDI (1982). *Manual para la evaluación de proyectos industriales*. El autor.
- Ocampo J. A. (2002). *Globalización y desarrollo*. CEPAL
- Piraquive Galeano, G. A., Matamoros, M., Céspedes Rangel, E., y Rodríguez Chacón, J. (2018). Actualización de la tasa de rendimiento del capital en Colombia bajo la metodología de Harberger. *Archivos de Economía, Documento 487*.
- Portafolio (19 de marzo, 2018). *Así se tejió la red para el transporte de petróleo en el país*. <https://www.portafolio.co/economia/asi-se-tejio-la-red-para-el-transporte-de-petroleo-en-el-pais-515353>
- Presidencia de la República (2010a). Decreto 2820. Por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. *Diario Oficial, 48.151*.

https://www.ani.gov.co/sites/default/files/decreto_2820_de_2010_licencias_ambientales.pdf

Presidencia de la República (2010b). Decreto 4728. Por el cual se modifica parcialmente el Decreto 3930 de 2010. *Diario Oficial*, 47932.

<https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=41009>

Presidencia de la República (2014). Decreto 2041, por el cual se reglamenta el Título VIII de la Ley 99 de 1993 sobre licencias ambientales. *Diario Oficial*, 49305.

<https://www.suin-juriscal.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1389917>

Project Management Institute – PMI (2021). *Guía de los fundamentos para la dirección de proyectos (Guía PMBOK)* (7.ª ed.). El autor.

Sapag Chain, N., y Sapag Chain, R., y Sapag Puelma, J. M. (2014). *Preparación y evaluación de proyectos* (4.ª ed.). McGraw-Hill.

Smith, C. E. (October 3, 2022). Pipeline materials' cost increases lift overall construction price. *Oil & Gas Journal*. <https://www.ogj.com/pipelines-transportation/pipelines/article/14283934/pipeline-materials-cost-increases-lift-overall-construction-price>

Superintendencia de Industria y Comercio – SIC (s. f.). *La promoción de la competencia en el acceso a oleoductos*.

<https://www.sic.gov.co/sites/default/files/files/Estudio%20Transporte%20por%20oleoducto.pdf>

The American Society of Mechanical Engineers – ASME (2018). *ASME B31.8. Gas Transmission and Distribution Piping Systems, ASME Code for Pressure Piping*. The author.

The American Society of Mechanical Engineers – ASME (2019). *ASME B31.4. Liquid Transportation Systems for Hydrocarbons, Liquid Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia and Alcohols*. The Author.

The American Society of Mechanical Engineers – ASME (2016). *Liquid Transportation Systems for Hydrocarbons, Liquid Petroleum Gas, Anhydrous Ammonia and Alcohols. ASME B31.4*.

Trading Economics (s. f.). Inflation Rate. World. *Indicators*.
<https://tradingeconomics.com/country-list/inflation-rate?continent=world>

Unicef (26 de abril, 2023). Escuelas seguras en Colombia: hagamos que aprender deje de ser un desafío de supervivencia. Las acciones armadas y violentas están afectando la continuidad del derecho a la educación y la protección de niñas, niños y adolescentes en Colombia. *Comunicado de prensa*.
<https://www.unicef.org/colombia/comunicados-prensa/escuelas-seguras-en-colombia>

ANEXOS

Anexo 1. Oleoductos - Gasoductos Histórico

Anexo 2. Índices de costos históricos

Anexo 3. Presupuesto Líneas de Flujo