

DISEÑO DE UN MODELO DE INGENIERIA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA
EXCEDENTE DEL CAMPO CASTILLA A FIN DE DISPONERLA EN CULTIVOS
QUE GENERAN BIOCOMBUSTIBLES, SEGÚN LA RESOLUCIÓN 1207 DE 2014.

CAMILO ANDRÉS GIL MALPICA
BRYAN ANDRÉS MENDOZA SERRANO

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2019

DISEÑO DE UN MODELO DE INGENIERIA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA
EXCEDENTE DEL CAMPO CASTILLA A FIN DE DISPONERLA EN CULTIVOS
QUE GENERAN BIOCOMBUSTIBLES, SEGÚN LA RESOLUCIÓN 1207 DE 2014.

CAMILO ANDRÉS GIL MALPICA
BRYAN ANDRÉS MENDOZA SERRANO

Proyecto integral de grado para optar por el título de
INGENIERO DE PETRÓLEOS

Director
Ing. Benjamín Alexis Garavito Linares
Ingeniero de Petróleos

FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS
BOGOTÁ D.C.
2019

Nota de Aceptación

Ing. Nelson Fernández Barrero

Ing. Jorge Andrés Tovar Moreno

Bogotá D.C . , agosto de 2019.

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente Institucional y Rector del Claustro

Dr. MARIO POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrector de Desarrollo y Recursos Humanos

Dr. LUIS JAIME POSADA GARCIA-PEÑA

Vicerrectora Académica y de Posgrados

Dra. ANA JOSEFA HERRERA VARGAS

Decano de la Facultad de Ingenierías

Ing. JULIO CESAR FUENTES ARISMENDI

Director del Programa de Ingeniería de Petróleos

Ing. JUAN CARLOS RODRIGUEZ ESPARZA

Las directivas de la Fundación Universidad de América junto con el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

DEDICATORIA

En primer lugar, quiero dedicarle este logro a Dios, sin él nada de esto sería posible, brindándome salud y conocimiento.

En segundo lugar, a mis padres Ariel Gil y Claudia Malpica quienes son mi ejemplo a seguir, y a mis hermanas Sofía e Isabella, a quienes amo y siempre han sido mi apoyo y motor durante todo este proceso y a lo largo de mi vida.

A toda mi familia que me ha apoyado y siempre han confiado en mis capacidades.

A mis amigos y cada una de las personas que me apoyó e hizo parte de este proceso, en especial a mi compañero de proyecto de grado Andrés Mendoza por compartir grandes momentos durante la carrera. Gracias.

CAMILO GIL

Este logro está dedicado a Dios, a mi padre, a mi madre y a mi hermana por apoyarme día a día durante este proceso y por confiar siempre en mis capacidades, también a mi compañero de proyecto Camilo por todas las experiencias compartidas.

BRYAN MENDOZA

AGRADECIMIENTOS

LOS AUTORES EXPRESAN SUS AGRADECIMIENTOS A:

Agradecemos a la empresa ACIPET por facilitar y permitir el desarrollo de este trabajo de grado.

Al ingeniero Benjamín Alexis Garavito Linares por confiar en nosotros y apoyarnos en la realización de este proyecto.

A la Fundación Universidad de América y al cuerpo docente, por brindar el conocimiento necesario para el desarrollo y culminación de este proyecto.

También queremos agradecer a los integrantes del comité de trabajos de grado, por brindar su paciencia, orientación y enseñanzas en la elaboración y finalización de este proyecto de grado.

A nuestras familias por acompañarnos en todo nuestro proceso de formación.

Y en general a todos nuestros compañeros, amigos, docentes y personas relacionadas con la universidad, que de una u otra manera estuvieron involucradas en la ejecución de este proyecto y a lo largo de nuestras carreras.

CONTENIDO

	pág.
RESUMEN	22
INTRODUCCIÓN	23
OBJETIVOS	24
1. DESCRIBIR LAS GENERALIDADES Y GEOLOGÍA DEL CAMPO CASTILLA	25
1.1 HISTORIA DEL CAMPO CASTILLA	25
1.2 LOCALIZACIÓN	27
1.3 MARCO GEOLÓGICO	29
1.3.1 Columna Estratigráfica.	29
1.3.2 Estratigrafía.	31
1.3.3 Geología Estructural.	33
1.3.4 Geología del Petróleo.	34
1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN	36
1.4.1 Métodos de producción.	37
1.4.2 Volúmenes de producción.	37
1.4.3 Características del yacimiento.	39
2.DISPOSICIÓN ACTUAL DEL AGUA PRODUCIDA EN EL CAMPO CASTILLA	40
2.1 NÚMERO DE POZOS	40
2.1.1 Proyecto en construcción.	40
2.1.1.1 Producción de Agua.	41
2.2 COMPOSICIÓN Y SEPARACIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.	41
2.2.1 Propiedades fisicoquímicas del Agua producida.	41
2.2.2 Separación y almacenamiento	43
2.3 ACTIVIDADES DEL CAMPO Y SU RESPECTIVO REQUERIMIENTO DE AGUA	45
2.3.1 Estaciones de Bombeo.	46
2.3.2 Obras Civiles.	48
2.3.3 Inyección de agua como método de recobro.	49
2.3.4 Vertimiento.	51
2.4 CANTIDAD DE AGUA EXCEDENTE PARA IMPLEMENTAR EN EL PROYECTO	53

3 .PARÁMETROS DICTADOS PARA LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN PROCESOS AGRÍCOLAS SEGÚN LA RESOLUCIÓN 1207 DEL 2014	54
3.1 OBJETIVO	54
3.2 REÚSO	54
3.3 CRITERIOS DE CALIDAD	54
3.4 DISTANCIAS MÍNIMAS DE RETIRO PARA EL DESARROLLO DEL REÚSO	56
3.5 PREVENCIÓN Y RIESGOS	57
3.6 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL AGUA PRODUCIDA	58
4 .GENERALIDADES DE LOS CULTIVOS DE PALMA Y CAÑA UTILIZADOS EN LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES	61
4.1 CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE	61
4.1.1 Origen del sector palmicultor en Colombia.	61
4.1.2 Características de la palma.	61
4.1.3 Metodología de extracción del aceite de palma.	63
4.2 CULTIVOS DE CAÑA DE AZUCAR.	64
4.2.1 Historia de la caña en Colombia.	65
4.2.2. Características de la caña.	65
4.3 BIOCOMBUSTIBLES	66
4.3.1 Alcohol Carburante (Etanol) en Colombia y sus ventajas ambientales.	67
4.3.2 Biodiesel en Colombia.	67
5. MODELO DE INGENIERÍA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA TOMANDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA, TRANSPORTE, UBICACIÓN Y MANEJO CON EL FIN DE DISPONERLA EN LOS CULTIVOS DE PALMA Y CAÑA	68
5.1 TOPOGRAFIA	68
5.1.1 La cartera topográfica	68
5.1.2 Altimetría.	68
5.1.3 Puntos de conexión.	71
5.1.4 Selección de Trazado.	71
5.2 CÁLCULOS DE LA INGENIERÍA DE DISEÑO	77
5.2.1 Tubería.	77
5.2.2 Metodología del diseño del modelo.	79

5.2.3 Selección de Bomba.	90
5.3 COSTO DE LA MATERIA PRIMA	92
5.4 TRANSPORTE ALTERNATIVO.	94
5.5 VARIABLE QUE RELACIONA ÁREA CON CAUDAL	96
5.5.1. Cálculo del valor del Barril de Agua.	98
6. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL MODELO DE INGENIERÍA MEDIANTE UN MODELO DE COSTO ANUAL UNIFORME EQUIVALENTE (CAUE).	101
6.1 ANÁLISIS DE COSTO DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN (CAPEX Y OPEX).	101
6.1.1 Línea de Flujo (Escenario 1).	101
6.1.2 Uso de Carrotanques (Escenarios 2).	104
6.2 EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO MEDIANTE CAUE.	105
6.3 ANÁLISIS FINANCIERO	106
7. CONCLUSIONES	107
8 .RECOMENDACIONES	109
BIBLIOGRAFIA	110
ANEXOS	112

LISTA FIGURAS

	pág.
Figura 1. Historia de desarrollo	26
Figura 2. Localización Campo Castilla	28
Figura 3. Columna Estratigráfica Cuenca de Los Llanos Orientales	30
Figura 4. Corte geológico Campo Castilla	34
Figura 5. Tratamiento y Proceso	44
Figura 6. Inyección de Agua	50
Figura 7. Cuenca del río Guayuriba	52
Figura 8. Palma de Aceite	62
Figura 9. Fruto de la Palma de Aceite	63
Figura 10. Caña de Azúcar	66
Figura 11. Mapa topográfico	69
Figura 12. Menú Contextual	70
Figura 13. Perfil Topográfico	70
Figura 14. Intersección Vía Chichimene	72
Figura 15. Intersección vía Acacias - Dinamarca – Surimena	72
Figura 16. Intersección río Acacias	73
Figura 17. Cruce de vías secundarias	74
Figura 18. Esquema del relleno para cruces de vías secundarias	75
Figura 19. Protección del lecho y las márgenes del cauce en roca	76
Figura 20. Zanja en roca	77
Figura 21. Viscosidad Cinemática del Agua	81
Figura 22. Rugosidad Absoluta de Materiales	82
Figura 23. Diagrama de Moddy	84
Figura 24. Condiciones de trabajo de la Bomba	92
Figura 25. Trayectoria de Carrotanque	95

LISTA TABLAS

	pág.
Tabla 1. Sistema petrolífero Cuenca Llanos Orientales	36
Tabla 2. Características del yacimiento	39
Tabla 3. Distribución de pozos del Campo Castilla	40
Tabla 4. Pozos autorizados en el último proyecto de perforación del Campo Castilla	41
Tabla 5. Composición de aguas de producción No tratadas	42
Tabla 6. Distribución del agua reutilizada	45
Tabla 7. Puntos de captación para la construcción de obras civiles, eléctricas, mecánicas y perforación de pozos	49
Tabla 8. Datos de seguimiento de piloto de inyección de agua Castilla	50
Tabla 9. Caracterización típica de agua a inyectar	51
Tabla 10. Vertimiento del recurso hídrico	52
Tabla 11. Propiedades fisicoquímicas del agua residual tratada para el uso agrícola	55
Tabla 12. Comparación de propiedades fisicoquímicas del Agua producida.	59
Tabla 13. Coordenadas punto de Origen y Destino	71
Tabla 14. Intersecciones en el Trayecto	73
Tabla 15. Propiedades y Características del PEAD Acuaflex	79
Tabla 16. Características de la Tubería	80
Tabla 17. Ficha Técnica de la Bomba EURO PUMP	91
Tabla 18. Relación de la Tubería	93
Tabla 19. Longitud de Perforación	94
Tabla 20. Costos por Viaje	96
Tabla 21. Costos de la Empresa ACUALIANZA S.A.	96
Tabla 22. Inversión del agua	99
Tabla 23. Comparación del Precio de Venta del Agua	100
Tabla 24. Costo total de Tubería	102

LISTA GRÁFICOS

	pág.
Gráfico 1. Histórico de producción	38
Gráfico 2. Distribución del agua	46
Gráfico 3. Gastos de compra del agua	99

LISTA ECUACIONES

	pág.
Ecuación 1. Diámetro Interno de Tubería	79
Ecuación 2. Ajuste de la Velocidad.	80
Ecuación 3. Número de Reynolds.	81
Ecuación 4. Rugosidad Relativa.	83
Ecuación 5. Pérdidas de Presión (m).	85
Ecuación 6. Pérdidas de Presión (PSI).	85
Ecuación 7. Sobrepresión máxima al cierre de la válvula.	86
Ecuación 8. Velocidad de Onda.	87
Ecuación 9. Pérdidas de Presión por Accesorios (m).	88
Ecuación 10. Pérdidas de Presión por Accesorios (PSI).	88
Ecuación 11. Ecuación General de la Energía.	89
Ecuación 12. Ecuación General de la Energía.	90
Ecuación 13. Ecuación General de la Energía.	90
Ecuación 14. Necesidad Neta de una Ha.	97
Ecuación 15. Ha a Irrigar.	97
Ecuación 16. Conversión de Nn a m ³	98
Ecuación 17. Precio diario del agua por Ha.	98
Ecuación 18. Precio del Agua por Día.	98
Ecuación 19. Valor del Barril.	100
Ecuación 20. Número total de Tubos.	101
Ecuación 21. Precio Total de Tubería.	102
Ecuación 22. Precio Total de Válvulas.	102
Ecuación 23. Costo de operación de la bomba	102
Ecuación 24. Precio de Excavación para el río.	103
Ecuación 25. Precio de Excavación para las vías.	103
Ecuación 26. Precio Total de Excavación	103
Ecuación 27. Inversión Total del Proyecto.	104
Ecuación 28. Número de viajes requeridos diariamente.	104
Ecuación 29. Costo Total de Carrotanque.	104
Ecuación 30. Tasa de Interés efectiva mensual.	105
Ecuación 31. CAUE para la Línea de Flujo.	105
Ecuación 32. CAUE para los carrotanques.	106

ABREVIATURAS

°C Grados Centígrados.

' Pies.

" Pulgadas.

, Decimales.

. Miles.

% Porcentaje

v Viscosidad Cinemática.

ρ Densidad.

ANH Agencia Nacional de Hidrocarburos.

ANLA Autoridad Nacional de Licencias Ambientales.

API American Petroleum Institute.

Bbl Barriles.

BOPD Barrels of Oil Per Day; Barriles de Petróleo Por Día.

BPD Barrels Per Day; Barriles Por Día.

BSW Agua libre y sedimentos presentes en el crudo.

BWPD Barrels of Water Per Day; Barriles de Agua Por Día.

CAPEX Capital presupuestado para las operaciones.

CAUE Costo Anual Uniforme Equivalente.

COP Pesos Colombianos.

cP Centipoises.

Fm Formación.

Ft Pies.

GPM Galones Por Minuto.

HA Hectáreas.

Hr Horas.

ID Diámetro Interno.

In Pulgadas.

Km Kilómetros.

M Metros.

mD Milidarcy.

Min Minutos.

mm Milímetros.

OD Diámetro Exterior.

P Presión.

Pág. Página.

PB Presión de Burbuja.

PSI Libra por Pulgada Cuadrada (Unidad de Presión).

PY Presión de Yacimiento

Q Caudal.

QO Caudal de Petróleo (BOPD).

QW Caudal de Agua (BWPD).

RPM Revoluciones Por Minuto.

SEG Segundos.
TIO Tasa Interna de Oportunidad.
TY Temperatura de Yacimiento.
USD United States Dollar.
V Volumen.

GLOSARIO

ACUÍFERO: formación geológica compuesta por una capa permeable saturada de agua sellada por capas impermeables en sus alrededores.

AGUAS RESIDUALES TRATADAS: son aquellas que han sido sometidas a operaciones o procesos unitarios de tratamiento que permiten cumplir con los criterios de calidad requeridos para su reuso.

AMBIENTE SEDIMENTARIO: es un punto de ambiente deposicional en el cual se acumulan sedimentos bajo ciertas condiciones ambientales, ya sea por acción del viento, agua o hielo; la localización y el clima tal como un desierto, pantano o río¹.

ANTICLINAL: plegamiento en el cual las rocas estratificadas buzan en sentido contrario, es decir, divergen a partir de un plano denominado axial. Cuyas capas más antiguas están situadas en el centro.

ARCILLA: sedimento con un tamaño inferior a 4 micras, constituida por un agregado de silicatos hidroaluminicos que pueden ir acompañados de otros minerales. Manifiesta propiedades plásticas cuando el contenido de agua oscila entre determinados límites. Sus minerales son filosilicatos hidratados principalmente de aluminio y magnesio, con tamaño de partícula muy fino, aspecto terroso, plásticos. Incluyen los grupos de caolinita, illita, esmectita y vermiculita. Algunos de estos sedimentos muestran colores claros y son utilizados en la industria de la cerámica.

ARENA: sedimento compuesto por granos minerales de tamaño entre 0,062 y 2 mm, que se origina por la meteorización de las rocas y que ha sido seleccionado por los agentes de transporte. Puede tener cualquier composición mineralógica².

ARENISCA: roca sedimentaria consolidada cuyo tamaño de grano varía entre 0,02 a 2 mm, con textura clástica y de grano normalmente fino, formados por fragmentos de roca o minerales, básicamente cuarzo, calcita, micas o feldespatos que pueden estar acompañados de otros, como la magnetita. Es considerada la principal unidad reservorio³.

BARRIL: es una medida de capacidad estándar para el aceite y demás productos.

¹ SCHLUMBERGER OILFIELD GLOSSARY. Depositional environment. [En línea]. Citado 26 de marzo del 2018. Disponible en: http://www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/d/depositional_environment.aspx

² RACEFN. Glosario de Geología. [en línea] citado 26 marzo 2016. Disponible en: http://www.ugr.es/~agcasco/personal/rac_geologia/rac.htm#A

³ DXMAPS. Areniscas. [En línea]. Citado 26 de marzo del 2016. Disponible en: <http://www.dxmaps.com/geo/areniscas.html>

BARRILES POR DÍA: al referirse a la producción de un pozo, es el número de barriles de fluido que produce un pozo en un periodo de 24 horas.

BIOCOMBUSTIBLE: son combustibles producidos a partir de biomasa, es decir, de materia orgánica originada en un proceso biológico, utilizable como fuente de energía.

BIODIÉSEL: es un biocombustible líquido producido a partir de los aceites vegetales y grasas animales, siendo la colza, el girasol y la soja las materias primas más utilizadas en la actualidad para este fin.

BIOETANOL: el alcohol etílico o etanol es un producto químico obtenido a partir de la fermentación de los azúcares que se encuentran en los productos vegetales, tales como cereales, remolacha, caña de azúcar, sorgo o biomasa. Estos azúcares están combinados en forma de sacarosa, almidón, hemicelulosa y celulosa.

CAMPO: geológicamente se conoce como una o varias acumulaciones en el subsuelo, en este caso, de petróleo en el subsuelo; donde está en un yacimiento, el cual va cambiando su forma geométrica generando así un entrapamiento que se encuentra sellado por una roca permeable.

COLUMNA ESTRATIGRÁFICA: representación gráfica de la secuencia geológica en determinada zona.

CONTRATO DE CONCESIÓN: es aquel contrato entre dos personas con el objeto de otorgar a una persona llamada concesionario, la prestación, operación, explotación, organización y/o gestión, total o parcial, de un producto, marca o servicio, o la construcción, explotación o conservación de una obra o bien destinados al servicio o uso público como en el caso de las concesiones que hace el estado para la construcción y administración de una autopista, puerto, aeropuerto, etc.

CRETÁCEO: periodo con duración aproximadamente de 72 millones de años. En los sedimentos del Cretácico Inferior, perdura el modelo de sedimentación Jurásico con desarrollo local. Al inicio del Cretácico superior se desarrolla una amplia transgresión marina que produjo la mayor extensión de la misma con respecto a las tierras emergidas existentes en la superficie terrestre.

CRITERIO DE CALIDAD: es el conjunto de parámetros con sus respectivos valores límites máximos permisibles que se establecen para un uso definido.

CUENCA: se trata de una depresión a una profundidad en la que se acumulan sedimentos y generalmente estas están delimitadas por fallas para ayudar al entrapamiento de hidrocarburos, si existen y si en las cuencas se encuentren las condiciones para que se dé un sistema petrolífero.

DEPÓSITOS: es la depositación de sedimentos que han sido acumulados después de haber tenido una migración a causa de viento, agua o cualquier fluido.

DIESEL: fracción destilada del petróleo, que se purifica especialmente para eliminar el Azufre, se usa sobre todo en motores tipo diésel.

EOCENO: periodo geológico comprendido entre el Paleoceno y el Mioceno de la era Cenozoica. Es el periodo de mayor duración de esta era, la cual fue de 30 millones de años. Se caracteriza porque en los depósitos sedimentarios se formaron microorganismos que dieron origen a los mayores yacimientos petrolíferos.

ESTRATIGRAFÍA: es la descripción de todos los cuerpos rocosos que forman la corteza terrestre y de su organización de unidades, las cuales están basadas en sus características o cualidades a fin de establecer su distribución y relación en el espacio y su sucesión en el tiempo para interpretar la historia geológica.

ESTRATO: es cada una de las capas de la tierra en las que se disponen las rocas sedimentarias, las cuales se forman por acumulación, compactación y cementación de sedimentos.

FACTOR DE RECOBRO: representa el porcentaje de la totalidad de petróleo o gas bajo la tierra en un área determinada, extraíble, con rentabilidad económica.

FALLA: discontinuidad que se forma por fractura en las rocas a lo largo de la cual hay un movimiento de uno de los lados respecto a otro (Techo-Base).

FALLA INVERSA: son fallas de desplazamiento vertical en las cuales el bloque de techo se mueve hacia arriba con respecto al bloque de piso.

FORMACIÓN: desde el punto de vista geológico, corresponde a la unidad estratigráfica que comprende un número de estratos de roca.

GRADOS API: sus siglas en inglés definen “American Petroleum Institute”, es aquella medida de densidad que describe el peso de un crudo.

HIDROCARBURO: compuesto orgánico que contiene átomos de hidrógeno y carbono.

LITOLOGÍA: hace parte de la geología, se enfoca en el estudio de las rocas, especialmente en las características físicas y químicas, textura, composición, mineralogía y el tamaño de grano o partícula.

MARCO GEOLÓGICO: abarca los principales parámetros de la zona donde se va a realizar un estudio geológico, como la localización geográfica y geológica, topografía, geomorfología, cartografía, litoestratigrafía y tectónica.

MIOCENO: periodo geológico comprendido entre el Oligoceno infrayacente y el Plioceno suprayacente. Tuvo una duración de 12 millones de años, en este periodo surgieron las grandes cordilleras (Los Alpes, Los Andes, El Himalaya, Los Alpinos y Los Pirineos).

OLIGOCENO: es una división de la escala temporal geológica que se inició hace 251 millones de años y finalizó hace 65 millones de años.

POROSIDAD: se define como la relación entre el volumen poroso y el volumen total de la roca el cual se estima en porcentaje.

POZO: es un agujero o hueco que une la superficie con la formación de interés o yacimiento.

POZO DE INYECCIÓN: un pozo en el que los fluidos se inyectan en vez de producirse, siendo el objetivo principal mantener la presión de yacimiento. Existen dos tipos principales de inyección: gas y agua. Los pozos de inyección de agua son comunes en las áreas marinas, donde el agua de mar filtrada y tratada es inyectada en una sección acuífera inferior del yacimiento⁴.

POZO DISPOSAL: pozo mediante los cuales se realiza la inyección de las aguas de producción a una formación subterránea profunda con el fin de servir de canal para disponer las aguas en el acuífero confinado.

PRODUCCIÓN: proceso que implica la buena factibilidad que poseen los diferentes yacimientos para ser explotados, por el hecho de que a partir de esta (producción) se explota y se obtiene realmente el hidrocarburo a comercializar, manejando gerencias que permiten organizar y llevar a cabo las buenas técnicas para conseguir el objetivo.

REÚSO: utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso al que se va a destinar.

ROCA GENERADORA: se denomina roca madre, base rocosa, sustrato rocoso u horizonte D, a la roca consolidada bajo las zonas recubiertas por materiales alterados o disgregados, suelos o regolitos, de la superficie de un planeta terrestre, por lo general de la Tierra. Es el horizonte basal de la estructura de un suelo.

⁴ SCHLUMBERGER OILFIELD GLOSSARY. Pozo de inyección. [En línea]. Citado 26 de marzo del 2018. Disponible en: www.glossary.oilfield.slb.com/Terms/i/injection_well.aspx

ROCA RESERVORIO: un yacimiento, depósito o reservorio petrolífero, es una acumulación natural de hidrocarburos en el subsuelo, contenidos en rocas porosas o fracturadas. Los hidrocarburos naturales, como el petróleo crudo y el gas natural, son retenidos por formaciones de rocas supra yacentes con baja permeabilidad.

SELLO: una roca relativamente impermeable, normalmente lutita, anhidrita o sal, que forma una barrera o una cubierta sobre y alrededor de la roca yacimiento, de manera que los fluidos no pueden migrar más allá del yacimiento. Un sello es un componente crítico de un sistema petrolero completo.

TRAMPA: es una estructura geológica o un rasgo estratigráfico capaz de retener hidrocarburos. Las trampas de hidrocarburos resultantes de cambios en el tipo de roca o de acuñamientos, discordancias u otros rasgos sedimentarios, tales como los arrecifes o las acumulaciones, se denominan trampas estratigráficas.

VERTIMIENTO: se realiza a partir de un medio de conducción, del cual se puede precisar el punto exacto de descarga a un cuerpo de agua, alcantarillado o al suelo. Los cuerpos de agua superficiales pueden ser: Ríos, embalses, lagunas, etc. pero de agua dulce.

YACIMIENTO: es una formación que se encuentra en el subsuelo, que, con porosidad y permeabilidad permite almacenar los fluidos que se encuentren allí (agua, gas, petróleo).

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UN MODELO DE INGENIERIA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA EXCEDENTE DEL CAMPO CASTILLA A FIN DE DISPONERLA EN CULTIVOS QUE GENERAN BIOCOMBUSTIBLES, SEGÚN LA RESOLUCIÓN 1207 DE 2014.

En el presente trabajo de grado se diseña un modelo de ingeniería que permite gestionar el agua de producción excedente del Campo Castilla con el fin de disponerla en cultivos de palma y caña que generan biocombustibles. Lo anterior se realiza bajo las normas y leyes que dicta la resolución 1207 del 2014 que es la encargada de regular la composición química de las aguas industriales que van a ser reutilizadas en procesos de irrigación. Para ello, se estudiaron las generalidades geológicas del campo, tales como historia, localización, estratigrafía, geología del petróleo e historia de producción y se describieron detalladamente todas las formas actuales de disposición del agua con las que cuenta el campo con sus respectivos caudales.

Se analizó la normatividad de la resolución antes mencionada y las características principales de los cultivos en los cuales se va a irrigar el agua para certificar que el recurso hídrico se encuentra en óptimas condiciones. De acuerdo con todos los parámetros analizados se investigaron los lugares de recolección y de disposición del agua y se ubicaron geográficamente para definir perfil topográfico, distancia entre los dos puntos y el trazado de la sección. Teniendo en cuenta esta información se eligieron los materiales como tubería y válvulas y se realizaron los cálculos para el diseño de la línea de flujo, hallando las pérdidas de presión para seleccionar la bomba adecuada. Después del diseño se calculó una constante de irrigación para los cultivos de la empresa Palmeras del Llano S.A. A partir de la constante de irrigación y simulando un modelo de eficiencia energética, se le da un precio al barril de agua vendido por Ecopetrol S.A.

Una vez diseñado el modelo con la línea de flujo se planteó un escenario alternativo en el cual se transporta el agua contratando un servicio de carrotanques. Se describieron y calcularon los requerimientos técnicos de este modelo y sus costos. Finalmente se llevó a cabo la evaluación financiera comparando los dos modelos mediante el uso del Costo Anual Uniforme Equivalente para determinar cuál es el mejor de estos.

Palabras claves: modelo, agua de producción, irrigación, medio ambiente, modelo económico.

INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso fundamental para la mayoría de las actividades económicas de nuestro país. El sector agroindustrial requiere aproximadamente el 48% de la oferta de agua del país para su desarrollo. Mediante la realización de este modelo se ayuda a cubrir una parte de esta demanda, se disminuye el impacto sobre el agotamiento de las fuentes hídricas y se da un uso al agua excedente de la producción petrolera en el Campo Castilla, la cual no se está aprovechando adecuadamente.

Este proyecto beneficia tanto a la empresa operadora como al medio ambiente, debido a que una parte esta agua no se desechada en los 10 pozos disposal con los que actualmente cuenta el Campo Castilla, ni tampoco se dispone en el rio Guayuriba. Gran parte de esta agua se reutiliza en cultivos de palma y caña, que al ser tratados producen biocombustibles como lo son el biodiesel y el etanol los cuales suplen mayoritariamente el consumo energético de los medios de transporte. Por otro lado, los biocombustibles presentan bajas emisiones de carbono ayudando a mitigar el cambio climático.

La realización de este modelo y su evaluación financiera permitió mostrar un nuevo uso del agua a la industria y dar a conocer un escenario que permite reducir costos a largo plazo a la empresa operadora. Lo anterior, debido a que se alivia el modelo económico pues actualmente se produce el agua y su disposición posterior tiene unos respectivos costos que son disminuidos y convertidos en ganancias mediante el diseño de este modelo. Paralelamente, se previenen situaciones de paradas en la producción de crudo por no contar con un modelo adecuado para el tratamiento y disposición de aguas residuales por parte de la Compañía Operadora.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Diseñar un modelo de ingeniería para la gestión del agua excedente del Campo Castilla a fin de disponerla en cultivos que generan biocombustibles, según la resolución 1207 de 2014.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Describir las generalidades y geología del Campo Castilla.
2. Describir la disposición actual del agua producida en el Campo Castilla.
3. Analizar los parámetros dictados para la reutilización del agua en procesos agrícolas según la resolución 1207 del 2014.
4. Describir generalidades de los cultivos de Palma y Caña utilizados en la generación de biocombustibles.
5. Diseñar el modelo de ingeniería para la gestión del agua tomando en cuenta los parámetros de calidad del agua, transporte, ubicación y manejo con el fin de disponerla en los cultivos de palma y caña.
6. Evaluar financieramente el modelo de ingeniería mediante un modelo de Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE).

1. DESCRIBIR LAS GENERALIDADES Y GEOLOGÍA DEL CAMPO CASTILLA

En este capítulo se presenta las principales características del Campo Castilla, con relación a la historia, localización, geografía, estratigrafía, marco geológico e historia de producción.

1.1 HISTORIA DEL CAMPO CASTILLA

La historia del Campo Castilla inicia en el año 1975, con la firma del Contrato de Concesión Cubarral donde participan las empresas Chevron Oil Company y Ecopetrol S.A, contrato que estuvo vigente hasta el 30 de enero del año 2000, año en el cuál Ecopetrol S.A suscribió un contrato adicional por seis meses con la empresa Chevron Oil Company para su administración, finalizado este contrato Ecopetrol S.A pasó a ser el operador directo del campo.

Durante el contrato desde 1975 al 2000 las dos Compañías (Chevron y Ecopetrol) perforaron 24 pozos en el Campo Castilla cuyas profundidades oscilaron aproximadamente de los 6.500 a los 9.000 pies.

El proceso de exploración para el Campo Castilla inició con el Pozo Castilla Norte-1 y Castilla Este-1 con el cuál se obtuvieron resultados positivos, produciendo crudo de gravedad API 12°.

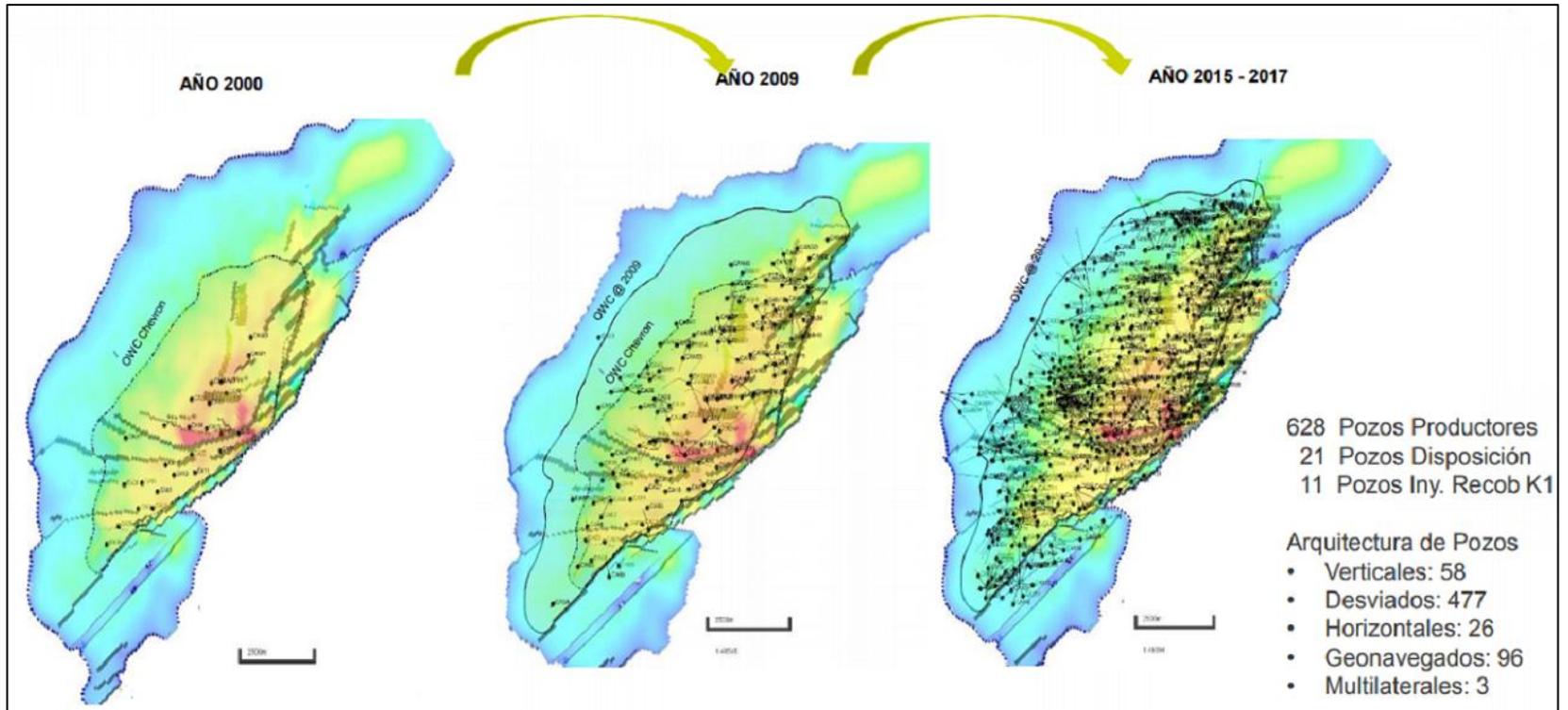
Por la inminente crisis petrolera que inició en el año 2014, se vieron afectadas las operaciones de perforación en un 100%, sin embargo, en el año 2015 para el mes de agosto se ve un incremento de producción en más de 17 mil barriles de petróleo crudo diarios con respecto al año anterior, y se logra retomar los proyectos de exploración en el año 2016 gracias a la subida del precio del crudo⁵.

A septiembre del 2018 el Campo Castilla cuenta con un área de 240.800 acres y consta de 387 pozos productivos, presentando un aumento de producción debido a las campañas de fracturamiento hidráulico implementadas desde el año 2012. Añadiendo un promedio diferencial de 170.000 barriles gracias a este método de estimulación a yacimiento operado en su totalidad por Ecopetrol S.A. donde las únicas empresas que han administrado este campo han sido, Ecopetrol S.A y Chevron Oil Company⁶.

⁵ REINOSO RODRIGEZ, Guillermo. Se revierte primer contrato de asociación de petróleo. El tiempo [En línea]. Consultado el 18-04-2019. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-1211777>

⁶ JORGE ITALO BAHAMON PEDROSA. Análisis Desempeño Fracturamiento Hidráulico Campo Castilla Campañas [Electronic (1)]: 2012- 2017 p. 10

Figura 1. Historia de desarrollo



Fuente: ECOPETROL S.A. Visión técnica de Ecopetrol en campos de crudo pesado ,2018 [En línea]. Disponible en: https://acipet.com/wp-content/uploads/2018/09/OJOSE-DARIO-PARRA-.Crudos-Pesados_Visi%C3%B3n-ECOPETROL-VF.pdf

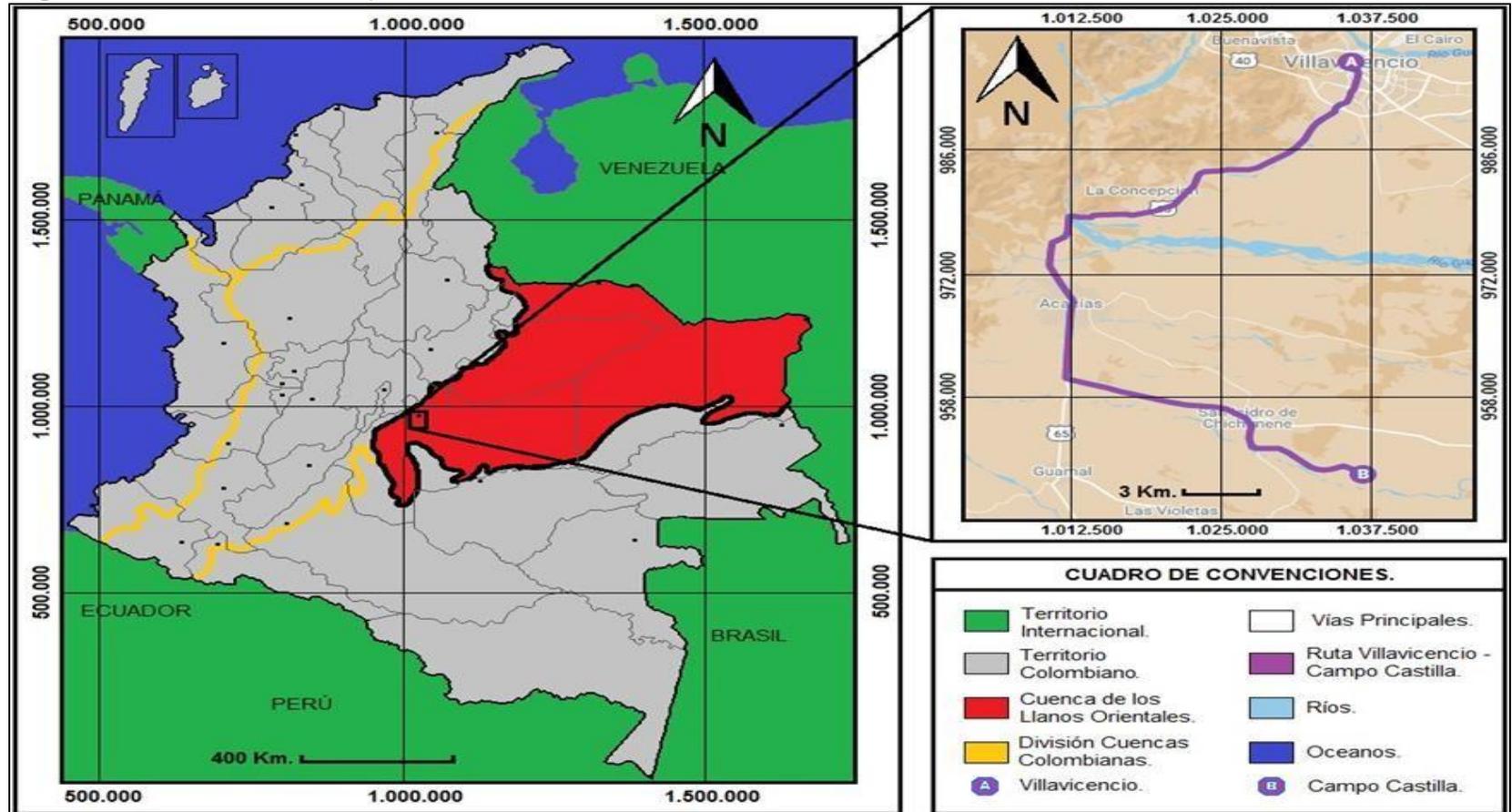
En la **Figura 1** se muestra la evolución y desarrollo de pozos perforados que ha tenido el Campo Castilla desde el año 2000 cuando Ecopetrol S.A pasa hacer el operador directo del Campo hasta el año 2017 con una totalidad de 660 pozos distribuidos en 628 pozos productores, 21 pozos de disposición y 11 pozos de inyección para recobro en la formación K1 o Guadalupe masivo.

1.2 LOCALIZACIÓN

El Campo Castilla se encuentra ubicado en la Cuenca de los Llano Orientales, Bloque Cubarral, Departamento del Meta jurisdicción de los municipios de Acacias y Castilla la Nueva a 170 km de la Ciudad de Bogotá.

Para acceder al Campo desde la ciudad de Bogotá (se puede acceder por vía aérea partiendo desde Bogotá hasta Villavicencio, en donde se debe hacer el recorrido descrito a continuación), por vía terrestre, se debe tomar por el Sur la ruta 40 que conduce hacia Villavicencio en un recorrido o trayecto de 95 kilómetros, pasando por los municipios Chipaque, Cáqueza, Quetame y Guayabetal. Desde Villavicencio, tomar la ruta 65 por una distancia de 60 kilómetros hasta Castilla la Nueva pasando por los municipios Acacias y Guamal, hasta llegar al Campo Castilla. En la **Figura 2** se observa la ubicación geográfica del Campo Castilla.

Figura 2. Localización Campo Castilla.



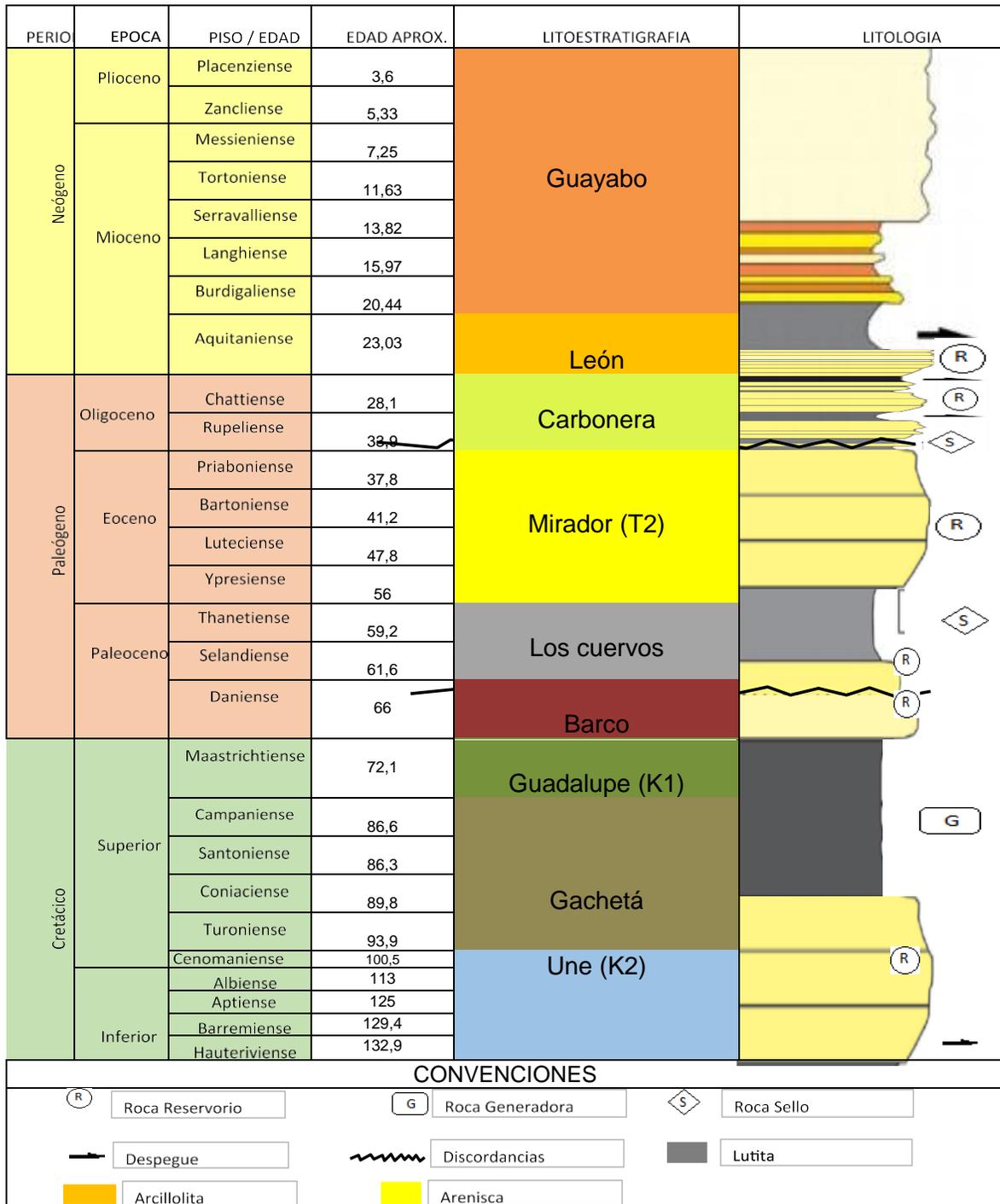
Fuente: elaboración propia, con base en: ROBAYO, J.; RODRIGUEZ, L. Evaluación técnico-financiera de las operaciones de perforación para la disminución de los tiempos no productivos durante los viajes en los pozos seleccionados en el campo castilla. [En línea]. Tesis de pregrado. Fundación Universidad de América, 2016. [Consultado 15 marzo 2019]. Disponible en: <http://repository.uamerica.edu.co/bitstream/20.500.11839/627/1/5092330-2016-2-IP.pdf>

1.3 MARCO GEOLÓGICO

En esta sección se describen: la Columna Estratigráfica de la Cuenca de los Llanos Orientales, estratigrafía, formaciones y unidades geológicas que la conforman, geología estructural y del petróleo asociadas al Campo Castilla.

1.3.1 Columna Estratigráfica. La **Figura 3** muestra la columna estratigráfica generalizada para la Cuenca de los Llanos Orientales, se describen las Formaciones que atraviesan los pozos, con unidades geológicas del Cretáceo al Neógeno.

Figura 3. Columna Estratigráfica Cuenca de Los Llanos Orientales.



Fuente: elaboración propia, con base en: AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca llanos Orientales: Integración Geológica de la digitalización y análisis de núcleo. Bogotá, D.C. 2012. p 46.

1.3.2 Estratigrafía. A continuación, se describe cada formación presente en la columna estratigráfica generalizada para la Cuenca de los Llanos Orientales, enfocándonos en las formaciones que atraviesan el pozo, como también se especifica cuál fue su ambiente depositacional y cuáles son las unidades que la infrayacen y suprayacen.

1.3.2.1 Formación Une. De Edad Cretácico medio⁷, conocida como unidad K2 para Ecopetrol; consiste en areniscas cuarzosas con intercalaciones menores de lutitas y limolitas carbonosas. Su espesor promedio es de 4.000 pies, se caracteriza por tener un ambiente de depositación deltaico, está en un contacto concordante con la Formación Gachetá la cual la suprayace.

1.3.2.2 Formación Gachetá. De Edad Cretáceo⁸; está compuesta por una secuencia de lutitas con desarrollos menores de areniscas, con contenido variable de glauconita, su espesor es superior de 600 pies en los pozos Chichimene-1, Vanguardia-1, Cumaral-1 y Medina-1, se caracteriza por tener un ambiente de depositación marino y se encuentra en contacto concordante tanto con la Formación Une que la infrayace como con la Formación Guadalupe que la suprayace.

1.3.2.3 Formación Guadalupe. De Edad Cretácico Tardío Superior⁹, principalmente está constituida por secuencias de areniscas masivas intercaladas por lutitas carbonosas, tiene un espesor promedio de 600 pies en los pozos Vanguardia-1, Cumaral-1 y Medina-1, se caracteriza por un ambiente sedimentario continental fluvial de canales entrelazados de baja sinuosidad con dominio de carga de lecho, se encuentra en contacto concordante con la Formación Gachetá que los infrayace y en contacto discordante con la Formación Barco que la suprayace.

1.3.2.4 Formaciones Barco y Los Cuervos. De Edad Paleoceno¹⁰, en el sector de Casanare, los depósitos continentales de las formaciones Barco y Los Cuervos son areniscas masivas, en el área de Arauca la Formación Barco consta de areniscas cuarzosas masivas de grano fino a grueso, con intercalaciones delgadas de lutitas; estas formaciones tienen un espesor promedio de 1.000 pies, aunque también se pueden tener espesores máximos de 1.710 pies, se encuentran en contacto discordante con la Formación Guadalupe que la infrayace y en contacto concordante con la Formación Mirador que la suprayace.

⁷ JULIVERT, Manuel. Léxico Estratigráfico de Colombia. París. Centre National de la Reserche Scientifique: 1968, p.460.

⁸ Ibid. p 252.

⁹ Ibid. p 265

¹⁰ Ibid. p 197

1.3.2.5 Formación Mirador. Conocida como Formación San Fernando (T2) según la nomenclatura tomada por Ecopetrol de Edad Eoceno Tardío¹¹, consisten de un conjunto de areniscas masivas con diferentes granulometrías, generalmente grano decrecientes de base a techo, esta formación aflora en la Cordillera Oriental y en los Andes de Mérida, el espesor promedio de esta formación, puede alcanzar 950 pies en el Pozo Florena-1, se encuentra en contacto discordante con la Formación Carbonera que la suprayace y en contacto concordante con la Formación Los Cuervos que la infrayace.

1.3.2.6 Formación Carbonera. De Edades desde el Oligoceno a Mioceno¹², se caracteriza por depósitos transgresivos y regresivos de corta duración de un mar epi-continental de poca profundidad, constituida por una secuencia homogénea de areniscas, con intercalaciones menos significativas de arcillolitas y limolitas, además de contar con lentes arenosos hacia la parte basal, ha sido dividida operacionalmente en 8 unidades (C1, C2, C3, C4, C5, C7 y C8), las unidades pares corresponden a arcillolitas y las unidades impares a areniscas, está en contacto concordante tanto con la Formación León que la infrayace como con La Formación Mirador que la suprayace, Según la ANH¹³.

A continuación, se realiza una breve descripción de las unidades mencionadas de la Formación Carbonera:

- ✓ Unidad C8: el carácter marino del tope de la Formación Mirador indica claramente un periodo de transgresión cuya continuidad es la unidad C8 de la Formación Carbonera, esta unidad, presenta un espesor promedio de 300 pies.
- ✓ Unidad C7: contiene areniscas, caracterizadas por tener un ambiente de depósito marino, deltaico y continental, tiene un espesor promedio de 250 a 280 pies.
- ✓ Unidad C6: el máximo espesor conocido de esta unidad arcillosa se encuentra en el sector Cumaral-1, con 600 pies.
- ✓ Unidad C5: está compuesta por alternancia de niveles de arcillolita y de arenisca, poco consolidada, de tamaño de grano, predominante medio, a veces

¹¹ Ibid. p 344

¹² Ibid. p 150

¹³ AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca de los Llanos Orientales,2012. [En línea]. Citado en 25 de marzo de 2019.Disponible en: <http://www.anh.gov.co/Informacion-Geologica-y-Geofisica/Tesis/5.%20Informe%20Final%20Llanos.pdf>.

grueso; en ocasiones ligeramente calcáreas, con glauconita. Tiene un espesor promedio de 230 pies.

✓ Unidad C4: compuesta por capas de areniscas, limolitas y lutitas. Tiene un espesor de 700 pies, aunque en pozos como Guacavia-1 puede llegar a espesores de 1.050 pies.

✓ Unidad C3: compuesta por capas de areniscas fina a gruesa, blanca a translúcida y algunos pies de limolitas y arcillolitas. Tiene un espesor que varía de 150 pies a 700 pies.

✓ Unidad C2: compuesta casi exclusivamente por arcillolitas con algunas intercalaciones arenosas y algunas limolíticas. Tiene un espesor promedio de 150 pies, aunque en pozos como Medina-1 puede llegar a alcanzar espesores de hasta 900 pies.

✓ Unidad C1: compuesta por arcillolita principalmente, separados por niveles delgados de limolitas hacia la parte superior y delgadas capas de areniscas hacia la parte inferior. Puede alcanzar espesores de hasta 2.000 pies.

1.3.2.7 Formación León. De Edad al mioceno entre el Langhiense y el Serravalliense¹⁴, constituida por capas gruesas de lutitas (en gran parte) e intercalaciones de limolitas. Los máximos espesores observados son de 2.500 pies y 1.980 pies correspondientes a los Pozos Chaparral-1 y Arauca-1 respectivamente, caracterizado por ser la última invasión de los mares terciarios en la cuenca. El ambiente de depositación es marino. Se encuentra en contacto concordante con la Formación Guayabo que la suprayace, como con la Formación Carbonera que la infrayace.

1.3.2.8 Formación Guayabo. De Edad Mioceno, está constituido por una alternancia de arcillolitas, muy solubles y areniscas mal seleccionadas, finas a muy gruesas, a veces con niveles de conglomerados, tiene un espesor máximo de 13.000 pies, se caracteriza por tener hacia la base una influencia marina y hacia el tope fluvial marino a continental, se encuentra en contacto concordante con la Formación León que la infrayace, como con la Formación Necesidad que la suprayace.

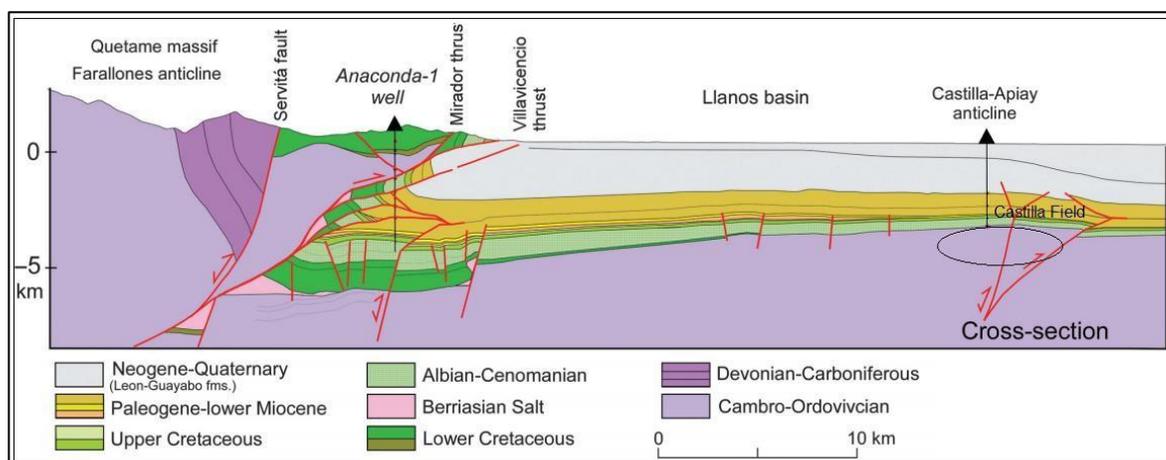
1.3.3 Geología Estructural. El Campo Castilla se encuentra geológicamente en la Cuenca de los Llanos Orientales cuya configuración obedece a una serie de esfuerzos extensivos que han afectado el noroccidente suramericano, formando un sistema transpresional (en el caso de la cuenca sistemas de fallas Castilla-Apiay) que dieron lugar a pliegues y fallas tanto inversas como normales y son

¹⁴ Ibid.,p.194

responsables de los entrampamientos del Campo Castilla¹⁵. En la interpretación estructural de la zona se propone un estilo dominado por fallas con desplazamiento de rumbo, con sus elementos principales, zona de cizallamiento, fallas normales, fallas inversas y pliegues bien definidos. (Ver **Figura 4**)

La estructura del Campo Castilla corresponde a un anticlinal cuyo eje presenta una orientación N60° E, de 5 Km de ancho y 13 Km de largo. La estructura se encuentra afectada por una serie de fallas normales con dirección NE-SW, algunas asociadas a la falla principal. Las fallas normales presentan saltos que varían de 30 a 120 pies y las fallas inversas con saltos muchos menores que varían entre 30 y 50 pies. Al parecer las fallas internas que afectan la estructura no presentan carácter sellante, puesto que el contacto agua-aceite no presenta cambios abruptos al lado y lado de las fallas, mostrando en general a lo largo del campo una misma inclinación. Las unidades son continuas en el área del Campo¹⁶.

Figura 4. Corte geológico Campo Castilla.



Fuente: elaboración propia, con base en :PACIFIC RUBIALES ENERGY, Área de exploración.2014. p7.

1.3.4 Geología del Petróleo. A continuación, se describen los parámetros y características principales del sistema petrolífero del Campo Castilla.

1.3.4.1 Roca Generadora. La constituye la Formación Gachetá por debajo del flanco Oriental de la Cordillera Oriental, correspondiente a lutitas del Cretácico Superior, está identificada como la principal roca generadora de la Cuenca de Los Llanos Orientales, asociada con un espesor promedio de 755 pies y un máximo de 2100 pies. Conformada por lutitas con kerógeno tipo II y III, rango de Carbón

¹⁵ BEICIP. Evaluación regional de la Cuenca de los Llanos orientales, Ecopetrol informe interno. 1995. p 6.

¹⁶ CHEVRON, ECOPELROL. Campo Castilla- Chichimene. 2016. p 4-5.

Orgánico Total (TOC) que oscila entre 1 y 3 %. La materia orgánica de la roca generadora aporta un índice de hidrógeno entre (HI) 200 mg y 400 mg HC /g TOC, lo cual indica que son portadoras de petróleo crudo. Con respecto a la ventana de generación de hidrocarburos (0.6% Ro 1,2%) en la sección central de la Cuenca de Los Llano Orientales¹⁷.

1.3.4.2 Roca Reservorio. Las rocas acumuladoras en la Cuenca de los Llanos Orientales son la Guadalupe Masivo (denominada K2), y la Formación Mirador conocida como Formación San Fernando (Denominada T2), en la cuenca se aumenta el espesor sedimentario sin excepciones de este a oeste; El espesor neto de la Formación T2 o Mirador está por encima de los 180 pies.

1.3.4.3 Migración del Petróleo. Se han registrado dos eventos importantes en la migración del hidrocarburo, el primer evento sucedió en el Eoceno Superior y Oligoceno, hasta el momento en el que la Cordillera Oriental se levantó en el Plioceno; el segundo evento sucedió en el Mioceno y continúa hasta la actualidad.

El hidrocarburo se entrampó en la parte oriental de la Cuenca de Los Llanos Orientales, migró desde la Formación Gachetá ubicada en el Piedemonte hasta la roca reservorio (Formación Mirador).

1.3.4.4 Roca Sello. El Campo Castilla, corresponden a los niveles arcillosos de las Formación Los Cuervos, Formación Carbonera (intervalos pares), intervalos lutíticos de las Formaciones Guadalupe y Gachetá; estas formaciones generan un sello regional, mientras que las otras formaciones generan sellos locales e intra-formacionales.

1.3.4.5 Trampas. Se establece la conexión del yacimiento por medio de fallas normales antitéticas, para los anticlinales asociados a fallas inversas y estructurales de bajo relieve, incluyendo trampas estratigráficas volviéndose un objetivo exploratorio, que puede llegar a ser alguna estructura de inversión.

A continuación, se resume en la **Tabla 1** el sistema petrolífero del Campo Castilla

¹⁷ Agencia Nacional de Hidrocarburos Colombia. Cuenca Llanos Orientales Integración Geológica de la digitalización y Análisis de Núcleos. [Print(0)]. Bogotá. [Consultado el 25 Agosto 2018]. Disponible en: shorturl.at/bcO38

Tabla 1. Sistema petrolífero Cuenca Llanos Orientales.

CUENCA	ROCA GENERADORA	MIGRACIÓN	ROCA RESERVORIO	ROCA SELLO	TRAMPA
Llanos Orientales	Formación Gachetá	Dos pulsos de migración han sido documentados, el primero durante el Eoceno-Oligoceno superior, y el segundo comienza en Mioceno y continúa hasta el presente.	Carbonera (C3, C5 y C7), Guadalupe y Mirador	Formación los Cuervos y Carbonera (C2, C4, C6 y C8)	Anticlinales fallados, fallas antitéticas, trampas estratigráficas.

Fuente: elaboración propia.

1.4 HISTORIA DE PRODUCCIÓN

A finales de 1976 inició la producción del Campo y la comercialización del crudo Castilla como combustible industrial. La producción inicial del Campo Castilla fue de 150 BPD. El Campo Castilla lleva produciendo 43 años, desde 1976 hasta la actualidad (2019). El primer pozo perforado en el Campo fue el pozo Castilla I por la compañía Chevron. Durante la década de los 90's, la producción del crudo Castilla fue de 19.594 barriles de crudo promedio mensual.

En el año 2000 el Campo Castilla pasa a cargo de Ecopetrol. Las reservas estimadas alcanzaban 242,5 millones de barriles, de los cuales, 220,2 millones de barriles correspondían a crudos pesados.

Entre el 2004 y el 2005 la producción de Castilla pasó de 27.205 BOPD, a 52.389 BOPD. Durante la década anterior la producción continuó en crecimiento, alcanzando su pico más alto en noviembre 28 del 2009, con 93.550 BPD¹⁸.

Para el mes de febrero del año 2016 la producción era de 129.538 barriles diarios incrementado 9,46% respecto a febrero del año 2015 de acuerdo a las cifras de la Agencia Nacional de Hidrocarburos, Castilla representa el 12% de la producción del país¹⁹.

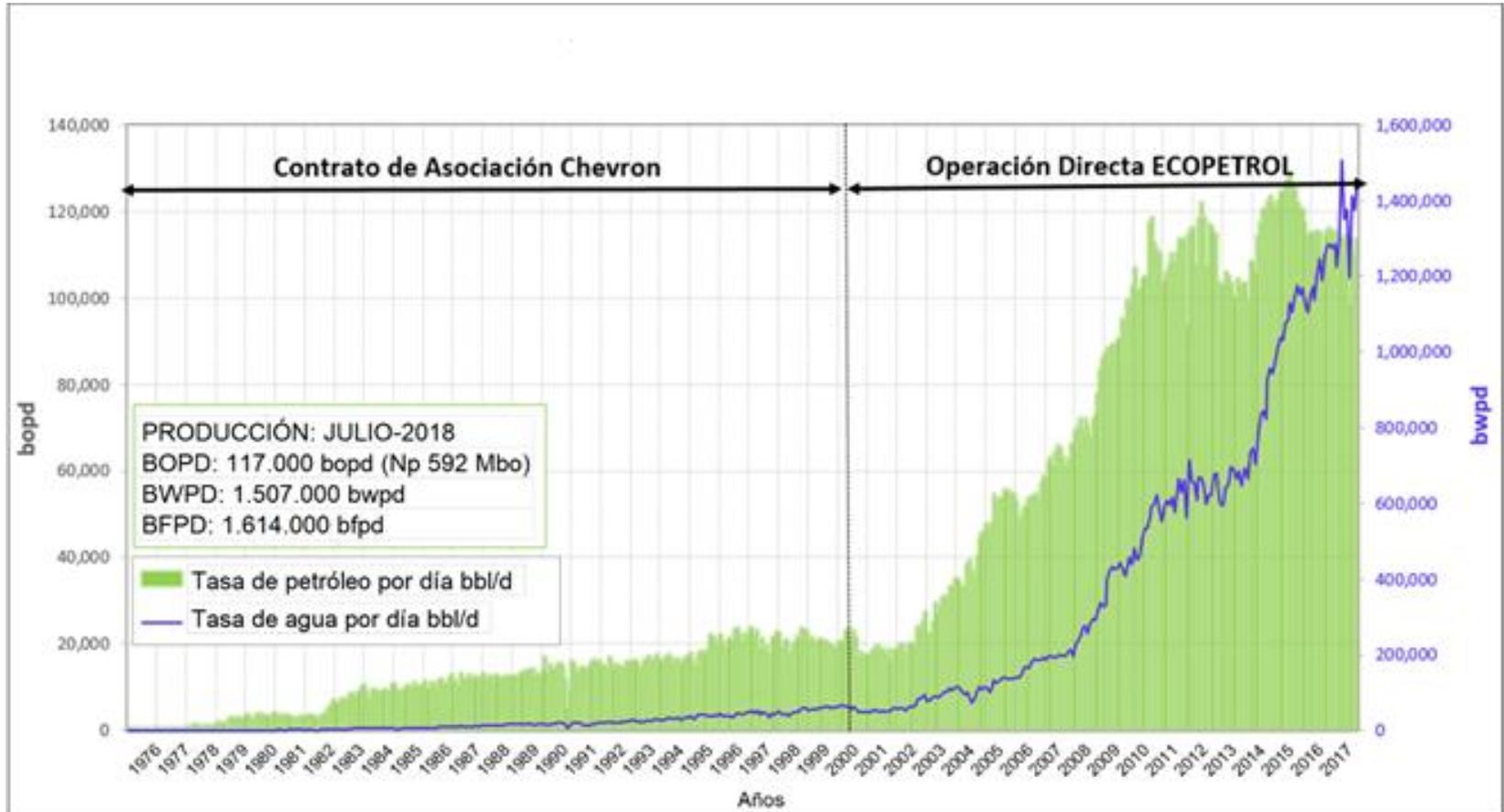
¹⁸ CHEVRON, ECOPETROL. Campo Castilla- Chichimene. 2016. p 2-4

¹⁹ VARGAS NUÑEZ, Pedro. Castilla, el único gran campo donde la producción de crudo ha mejorado. [0]. Mayo 9, [Consultado el 23 de marzo del 2019]. Disponible en: <http://www.portafolio.co/negocios/empresas/unico-campo-colombia-produccion-crudo-mejorado495497>

1.4.1 Métodos de producción. El mecanismo de producción predominante en el Campo Castilla es un acuífero activo. El acuífero genera la presión suficiente para que el crudo fluya naturalmente, sin embargo, la influencia del acuífero se disminuye a medida que se encuentra en la Formación Guadalupe unidad K1, por esto, cuando la energía no es suficiente se debe hacer uso de un método de bombas electro sumergibles para poder extraer el crudo. Sin embargo, para aumentar el factor de recobro, desde el año 2013 se realizan proyectos piloto de inyección de agua donde ha arrojado resultados positivos en la producción de petróleo y ayuda con una de las estrategias de disposición del agua producida.

1.4.2 Volúmenes de producción. Desde que el Campo Castilla inició su producción en el año de 1976, se ha mantenido en constante aumento. En el año 2000 cuando Ecopetrol pasa hacer el único operador directo del Campo se comienza a ver un aumento considerable en la producción de crudo el cual pasa de 20.000 barriles por día a llegar a una producción máxima de alrededor de 130.000 barriles por día. También se comienza a ver una alta producción de agua que pasa de 80.000 BWPD a 1'500.000 BWPD. **(Gráfico 1).**

Gráfico 1. Histórico de producción.



Fuente: elaboración propia, con base en: ECOPETROL S.A, Historial de producción de petróleo y agua del Campo Castilla desde 1976 a 2017, Meta 2018.

1.4.3 Características del yacimiento. El yacimiento produce petróleo tipo asfáltico con gravedad API promedio de 13, 7° a 60°F por empuje de acuífero activo. Se detecta un único contacto agua petróleo inclinado el cual buza en dirección N35°E con un ángulo de 1, 74°. En la **Tabla 2** se observan la caracterización del yacimiento.

Tabla 2. Características del yacimiento.

CAMPO CASTILLA	UNIDADES	FORMACIÓN GUADALUPE (K1 - K2)	FORMACIÓN MIRADOR (T2)
TIPO DE CRUDO	-	Aceite Negro	Aceite Negro
PROFUNDIDAD DEL YACIMIENTO	ft	7000	6800
ESPESOR NETO PROMEDIO	ft	39 - 109	203 - 528
MECANISMO DE PRODUCCIÓN	-	Gas en Solución	Acuífero Activo
TEMPERATURA DEL YACIMIENTO	°F	193	198
POROSIDAD	%	10,8 - 28	13,9 - 23,4
PERMEABILIDAD	Md	1 - 1667	465 - 2423
SATURACIÓN INICIAL DE AGUA	%	20	20
GRAVEDAD	°API	13,7	20
GOR	SCF/STB	100 - 300	100 - 300
VISCOSIDAD ACEITE @ TEMPERATURA DE YACIMIENTO	Cp	134	450
FACTOR VOLUMÉTRICO	RB/STB	1,042	1,03
GRAVEDAD ESPECÍFICA DEL GAS	-	0,906	0,906
PRESIÓN DE BURBUJA	Psi	90	148
PRESIÓN INICIAL @ 5600 TVDss	Psia	2830	3100
PRESIÓN ACTUAL @ 5600 TVDss	psia	2450	3000

Fuente: LOZANO SALAZAR, Viera, et al. Metodología para la selección de pozos candidatos a perforar en condiciones de bajo-balance. Aplicación al Campo Castilla de Ecopetrol S.A. En: REVISTA FUENTES: EL REVENTÓN ENERGÉTICO. Julio. Vol. Vol. 9, p. 71.

2.DISPOSICIÓN ACTUAL DEL AGUA PRODUCIDA EN EL CAMPO CASTILLA

En este capítulo se especifica la cantidad total de agua producida por el Campo diariamente. Adicionalmente se da a conocer el uso de las aguas excedentes, siendo los principales:

- Inyección para mantener o aumentar la presión en el yacimiento
- Disposición en pozos disposal o vertimiento en fuentes fluviales
- Excedente para proyectos piloto de riego

2.1 NÚMERO DE POZOS

Conocer la cantidad de pozos en el Campo Castilla es importante puesto que, al ser este un Campo con un extenso acuífero activo, la relación entre número de pozos existentes y cantidad de barriles de agua producida diariamente es directamente proporcional. En algunas ocasiones esta agua representa un mecanismo de producción primario debido a que ejerce una fuerza de empuje sobre el resto de los fluidos del yacimiento, como es el caso del Campo Castilla. En la actualidad el Campo Castilla cuenta con 664 pozos perforados, que se distribuyen como se observa en la **Tabla 3**.

Tabla 3. Distribución de pozos del Campo Castilla.

POZOS	# DE POZOS
ACTIVOS	582
INACTIVOS	29
COMPLETADOS	4
DESCONECTADOS	7
ABANDONADOS	2
DISPOSAL	21
INYECTORES	19
TOTAL	664

Fuente: Ecopetrol S.A

2.1.1 Proyecto en construcción. Para el año del 2017 se autorizó la perforación de 797 pozos en un área de 8 Ha, los cuales se ubican de acuerdo a la **Tabla 4**. Del total de estos pozos, 370 (de inyección y disposal), tienen el fin de disponer el agua al mismo tiempo que se aprovecha para aumentar el recobro.

Este plan de perforación demuestra que el Campo proyecta una alta producción de agua, la cual demanda más proyectos para su manejo, pero a su vez puede ser aprovechada para los cultivos de palma y caña para posteriormente generar biocombustibles.

Tabla 4. Pozos autorizados en el último proyecto de perforación del Campo Castilla.

UBICACIÓN	POZOS DE PRODUCCIÓN	POZOS DE INYECCIÓN	POZOS NFE	POZOS DISPOSAL
Plataformas sin ampliación de área	387	110	-	10
Clústeres existentes con ampliación de área		140	-	-
Plataformas nuevas		110	40	-
TOTAL	387	360	40	10

Fuente: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), ECOPETROL S.A, Resolución 293 del 18 de marzo de 2016.

2.1.1.1 Producción de Agua. El corte de producción de agua diario en el mes de marzo del 2019 fue de 1.040.000 BWPD²⁰.

2.2 COMPOSICIÓN Y SEPARACIÓN DEL AGUA DE PRODUCCIÓN.

Los yacimientos de crudo generalmente contienen grandes cantidades de agua y debido a que presentan una mayor densidad que los hidrocarburos, se ubican en la parte inferior de los reservorios. En algunas ocasiones esta agua representa un mecanismo de producción primario que ejerce una fuerza de empuje sobre los demás fluidos presente en el yacimiento, como es el caso del Campo Castilla. Toda esta agua sale del reservorio a la superficie acompañando al petróleo y a medida que la producción de petróleo disminuye, la proporción de agua producida junto con este aumenta.

Esta agua producida puede salir emulsionada o libre, en ambos casos se necesita de un proceso de separación y tratamiento.

2.2.1 Propiedades fisicoquímicas del Agua producida. En la **Tabla 5** se muestra las propiedades fisicoquímicas más relevantes del agua de producción del Campo Castilla, las cuales provienen de un análisis de laboratorio realizado a muestras tomadas en las estaciones Castilla II y Acacias.

²⁰ Ecopetrol S.A, marzo 2019.

Tabla 5. Composición de aguas de producción No tratadas.

COMPONENTE	UNIDAD	ESTACIÓN CASTILLA II	ESTACIÓN ACACIAS
pH	Unidades de PH	7,25	6,90
Conductividad	Us/Cm/°C	813	409
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	4,00*E(+2)	1,06*E(+4)
Fenoles Totales	mg/L	N/A	N/A
Hidrocarburos Totales	mg/L	<0,41	<0,41
Cianuro Libre	mg CN°/L	<0,010	<0,010
Cloruros	mg Cl°/L	192	81,5
Fluoruros	mg F°/L	NS	NS
Sulfatos	mg SO ₄ ^{2°} /L	8,50	7,94
Aluminio	mg Al/L	0,0255	0,104
Berilio	mg Be/L	<5,83	<5,83
Cadmio	mg Cd/L	<0,704	<0,704
Cinc	mg Zn/L	<13,1	<13,1
Cobalto	mg Co/L	<1,46	<1,46
Cobre	mg Cu/L	<0,430	<0,430
Cromo	mg Cr/L	<3,07	<3,07
Hierro	mg Fe/L	2,451	1,432
Mercurio	mg Hg/L	<0,399	<0,399
Litio	mg Li/L	219	171
Manganeso	mg Mn/L	0,117	0,0858
Molibdeno	mg Mo/L	<1,65	<1,91
Niquel	mg Ni/L	<2,54	<2,54
Plomo	mg Pb/L	<0,822	<0,822
Sodio	mg Na/L	108	58,14
Vanadio	mg V/L	0,753	0,602
Arsénico	mg As/L	1,58	1,68
Boro	mg B/L	197	142
Selenio	mg Se/L	<15,4	<15,4
Cloro Total Residual	mg Cl ₂ /L	N/A	N/A
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	<0,11	<0,11

Fuente: Autoridad Ambiental en el Departamento del meta, CORMACARENA, Expediente 97-0023, pág. 15-19 ,2018.

***NA: No Aplica**

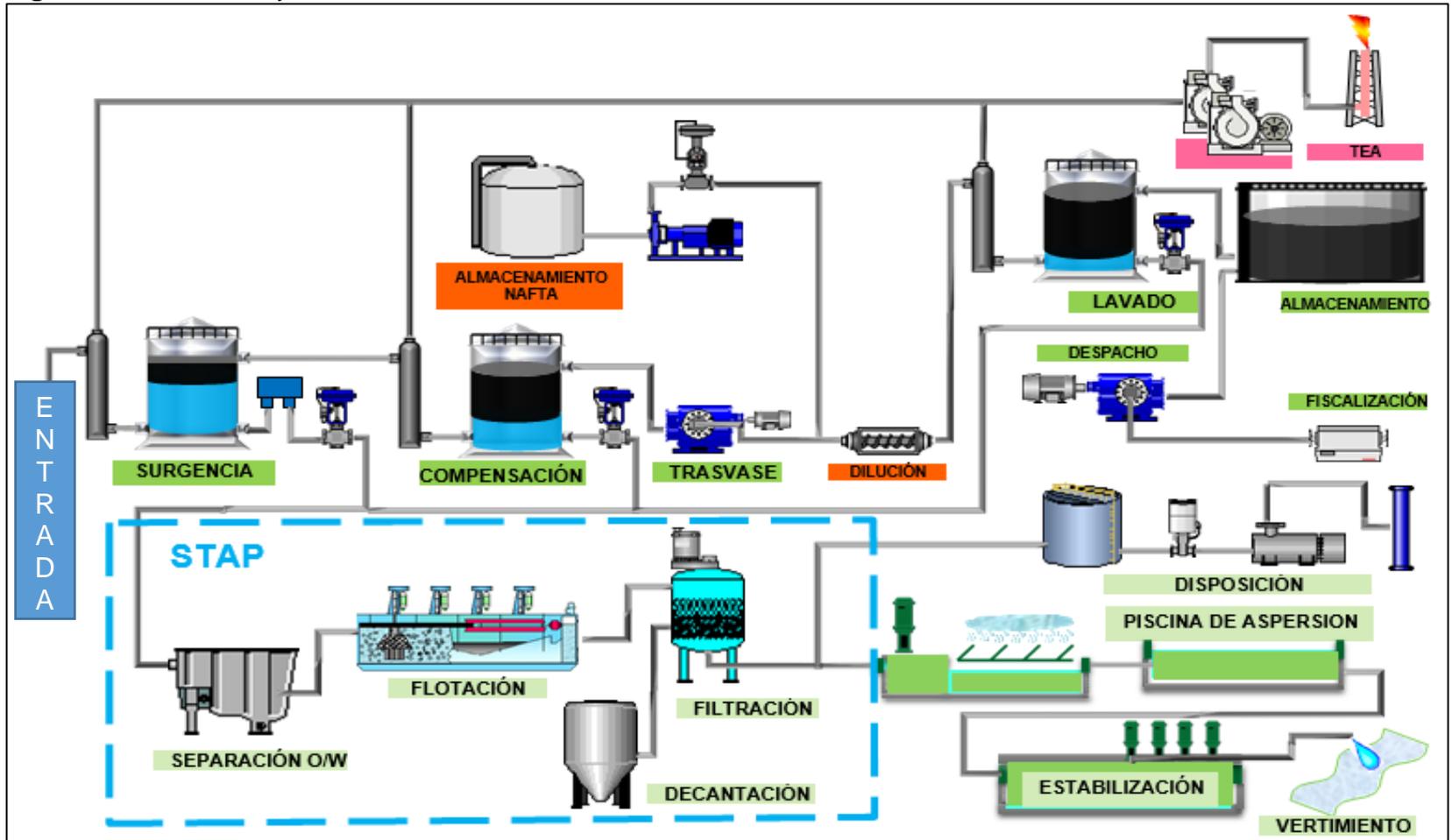
***NS: No Solicitado**

2.2.2 Separación y almacenamiento La separación se divide en varios pasos que se explican a continuación:

- Se extrae el crudo y el agua asociada de los diferentes pozos productores.
- El petróleo y el agua asociada se envían a las estaciones Castilla I, Castilla II y Acacias.
- Se realiza la separación y tratamiento de agua asociada en sistemas de tratamiento de agua (Stap), primero pasando por el tanque de almacenamiento de crudo y agua, luego se realiza la separación por adición química, después por medio de decantación (el crudo sobrante queda en la parte superior del tanque de decantación mientras el agua sigue su recorrido), posteriormente se pasa el fluido por un sistema de aspas (el crudo que queda adherido a las aspas en la parte superior y luego se deposita en un recipiente de almacenamiento; finalmente el agua reduce su temperatura y se oxigena mediante un sistema de aspersión y ventilación).
- Luego de todo su proceso de separación, el agua que ya está a temperatura ambiente se transporta mediante línea de flujo a piscinas de oxidación. En estas piscinas una banda sinfín atrapa el crudo remanente en el agua y así queda 100% tratada y lista para ser vertida.
- De los tanques de almacenamiento de agua se distribuye para las diferentes áreas de reutilización (disposición y vertimiento, inyección).

En la **Figura 5** se muestra el proceso de separación, almacenamiento y disposición.

Figura 5. Tratamiento y Proceso.



Fuente: elaboración propia, con base en: Ecopetrol S.A, Procesos de Separación, Tratamiento y Disposición de la producción del Campo Castilla.2018.

2.3 ACTIVIDADES DEL CAMPO Y SU RESPECTIVO REQUERIMIENTO DE AGUA

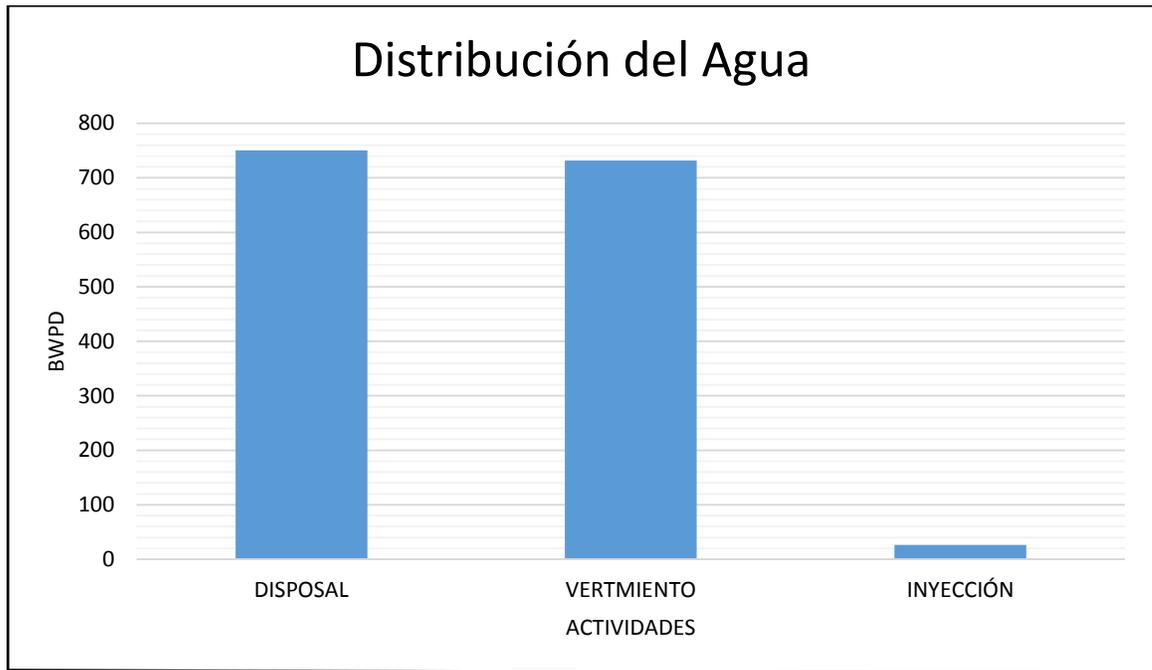
El Campo Castilla requiere del agua para diversas actividades y para ello se cuenta con estaciones de bombeo las cuales reciben, tratan y distribuyen los fluidos de los diferentes pozos. A continuación, se describen estas estaciones y las finalidades del agua que pasa por ellas (**Tabla 6**).

Tabla 6. Distribución del agua reutilizada.

EVALUACIÓN	POZOS ACTIVOS	POZOS NO ACTIVOS	BWPD
PAD1	5	0	341.702
PAD3	10	0	382.781
PAD4	5	0	25.625
DISPOSAL	20	0	750.178
INY. SUR	7	1	12.889
INY. NORTE	8	3	13.264
INYECCIÓN	15	4	26.153
VERTIMIENTO			731.749
OTRAS			13.136
TOTAL			1.521.216

Fuente: ECOPETROL S.A.

Gráfico 2. Distribución del agua.



Fuente: elaboración Propia.

En el **Gráfico 2** se observa cada fin que tiene el agua de producción y las proporciones en las cuales se distribuye, y da como resultado que la actividad que requiere de mayor cantidad de agua residual tratada es el vertimiento en los pozos disposal con 750.178 BWPD en total.

2.3.1 Estaciones de Bombeo. Por algunas razones como economía, eficiencia y seguridad, en la industria petrolera, el método preferido para transportar grandes cantidades de fluido en un territorio es mediante tuberías de transporte de gran diámetro. Los líquidos en movimiento a través de estas líneas de flujo sufren en el trayecto caídas de presión debido al rozamiento. La solución a este problema son las estaciones de bombeo que se localizan a intervalos regulares para potenciar la presión a lo largo de la tubería. Una estación de bombeo incluye: bombas centrífugas, filtros y válvulas.

El Bloque Cubarral se encuentra dividido en dos áreas de explotación correspondientes a los Campos Castilla y Chichimene, estos dos campos están conectados mediante líneas de flujo que transportan crudo, agua de producción y nafta provenientes de los pozos de desarrollo, el Campo comprende las estaciones Castilla I, Castilla II, Castilla III (en construcción), Acacias, San Fernando (en construcción) y Chichimene. Estas estaciones tienen la posibilidad de manejar y/o recibir fluidos de otros bloques, para incorporar el petróleo al

sistema nacional de oleoductos para su venta y comercialización y distribuir el agua a las diferentes áreas donde se requiera²¹.

2.3.1.1 Estación Castilla I (IECV) Ubicada en el extremo sur del Bloque, al nororiente del municipio de Castilla La Nueva. La Estación tiene una capacidad para manejar 30.000 BOPD, los cuales una vez tratados se envían por medio de una línea de flujo a la Estación Castilla II o despachado desde el cargadero en carrotanques hacia las estaciones de bombeo de Ecopetrol (primordialmente hacia las estaciones Vasconia, Ayacucho y Arguaney).

2.3.1.2 Estación Castilla II (EC2) Ubicada en el sector centro-sur del Bloque Cubarral, al nororiente de la Estación Castilla I y al sur de la Estación Castilla III en el municipio de Castilla La Nueva. Tiene una capacidad de tratamiento de 45.000 BOPD y 450.000 BWPD, los cuales una vez tratados, se despachan vía oleoducto hacia la Planta Apiay para su bombeo e ingreso a la red nacional de oleoductos. La Estación cuenta con dos módulos de tratamiento que operan en paralelo. El agua tratada se envía a torres de enfriamiento para luego realizar el vertimiento en el río Guayuriba o hacia los filtros de cáscara de palma, cuando la disposición se realiza por reinyección en los pozos Disposal.

2.3.1.3 Estación Acacias (E4) Ubicada al nororiente de la Estación Castilla II, cuenta con capacidad para manejar 60.000 BOPD y 840.000 BWPD, los cuales una vez tratados, se despachan vía oleoducto hacia la Planta Apiay para su bombeo e ingreso a la red nacional de oleoductos.

2.3.1.4 Estación Chichimene (ECU) Ubicada al norte del Bloque Cubarral, en el Campo Chichimene y al norte de la Estación Castilla I, tiene la capacidad de manejar 75.000 BOPD y 85.000 BWPD. La Estación tiene la capacidad de procesar dos tipos de crudo: extrapesado proveniente de la Unidad operacional T2, el cual requiere dilución con nafta para poder disminuir la viscosidad y crudo de peso mediano de las Unidades K1 y K2. El crudo es enviado por medio de líneas de flujo hacia la Estación Castilla II y posteriormente a la Planta Apiay, para su bombeo e ingreso a la red de oleoductos. El gas recolectado en los separadores es enviado a una red donde se aprovecha una parte como combustible o gas de blanketing y el resto es enviado a una de las teas instaladas, donde es quemado.

2.3.1.5 Estación Castilla III (EC3) (En construcción) Ubicada hacia el centro del Bloque Cubarral, tendría la capacidad de manejo de 90.000 BOPD y 1'800.000

²¹ Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), ECOPETROL S.A, Resolución 293 del 18 de marzo de 2016.

BWPD. El crudo con las especificaciones de venta sería despachado a la Estación Castilla II y a la Estación San Fernando para ingresar al oleoducto. Las aguas de producción serán tratadas en el STAP (clarificado, tratamiento de lodos, enfriamiento), el agua tratada será enviada a la Estación Acacias para su disposición final en el río Guayuriba, a la Estación Castilla II para su disposición final en los disposal y/o pozos inyectores.

2.3.1.6 Estación San Fernando (ESF) (En construcción) Ubicada al norte de la estación Castilla III, En esta Estación se realizará únicamente el almacenamiento de aproximadamente 1'050.000 barriles de crudo tratado y 400.000 barriles de nafta, previo al bombeo de los mismos para la venta o destino final.

2.3.2 Obras Civiles. Dentro del Campo se realizan obras de construcción de diversas estructuras y locaciones que van desde las excavaciones hasta la construcción de tanques e infraestructuras requeridas para el óptimo desarrollo de las actividades de exploración y explotación.

Para las actividades de adecuación de obras civiles en las plataformas de cada uno de los Clúster, pruebas hidrostáticas de la línea de flujo, perforación de pozos y pruebas de producción, se realiza aprovechamiento del recurso hídrico de las fuentes autorizadas para el bloque Cubarral, agua lluvia almacenada y de ser técnicamente viable, se usa agua de producción tratada de las estaciones del Campo.

En la **Tabla 7** se observa las fuentes que abastecen el agua requerida para las diferentes actividades que se realizan en el Campo, junto con su respectivo caudal.

Tabla 7. Puntos de captación para la construcción de obras civiles, eléctricas, mecánicas y perforación de pozos.

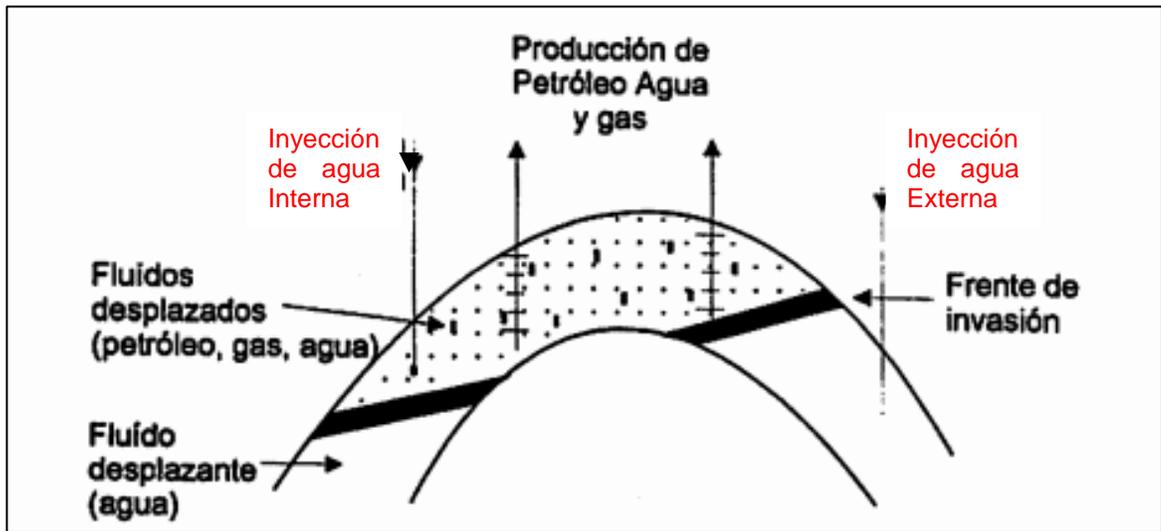
FUENTE	CAUDAL (Lt/Seg)	ESTADO VIGENCIA	TIPO DE FUENTE
Pozo profundo Estación Acacias	8	Vigente hasta 2020	Subterránea
Pozo de agua Estación Castilla I	4,27	Vigente hasta 2018	Subterránea
Pozo de agua Estación Castilla II	4	Vigente hasta 2018	Subterránea
Caño Grande	6,5	Vigente hasta 2019	Subterránea
Caño Cacayal	5,5	Vigente hasta 2019	Subterránea

Fuente: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), ECOPELROL, 2018.

2.3.3 Inyección de agua como método de recobro. La inyección de agua es un método de recobro mejorado o recobro secundario que consiste en el proceso de inyectar agua con el propósito de incrementar la energía o recuperación de hidrocarburos en un yacimiento, es hoy en día la técnica más utilizada en el mundo. Existen dos formas de realizar este método de inyección como se observa en la **Figura 6**.

- **Inyección de agua periférica o externa:** este método consiste en la inyección de agua en el área externa de la zona de petróleo a través de pozos inyectoras, cuya profundidad debe ser la adecuada para que el agua sea añadida al acuífero relacionado al yacimiento.
- **Inyección de agua en arreglos o interna:** este método consiste en la inyección de agua dentro de la zona de petróleo, para generar que los fluidos presentes se desplacen hacia los pozos productores que están ubicados mediante un arreglo geométrico con respecto a los inyectores.

Figura 6. Inyección de Agua.



Fuente: PDVSA .Recobro adicional de petróleo por métodos convencionales. Pág. 11.

2.3.3.1 Caudales de Inyección. En la **Tabla 8** se puede observar el seguimiento y monitoreo de un piloto de inyección, se realiza mediciones de presiones y caudales de inyección en cabeza de pozo.

Tabla 8. Datos de seguimiento de piloto de inyección de agua Castilla.

ÁREA	POZO INYECTOR	TASA DE INYECCION DE AGUA (BWPD)	PRESION DE INYECCION (PSI)
1	CA - 36	1058	525
	CA - 75	1739	400
	CA - 144	1699	525
	CA - 222	1366	559
2	CAN - 05	1696	1000
	CAN - 01	1384	199
	CAN - 08	1003	425
	CAN - 09	998	567
4	CAN - 49	678	526
	CAN - 51	309	1387

Fuente: ECOPETROL S.A, Reporte de cumplimiento ambiental, 2018.

2.3.3.2 Composición del agua a inyectar. En la **Tabla 9** se muestra la caracterización típica del agua a inyectar para dos pozos que corresponde a agua de producción tratada en la Estación Acacias.

Tabla 9. Caracterización típica de agua a inyectar.

PARAMETROS	RESULTADOS	
	CH 29	CH 47
O/W (ppm)	0,14	0,18
pH	7,88	7,86
Fe (ppm)	0,88	0,87
Fosfonatos (ppm)	2	2
Conductividad (μ /cm)	4,95	4,88
Alcalinidad M (ppm)	310	458
Alcalinidad P (ppm)	0	0
Dureza Total (ppm Ca CO ₃)	498	480
Dureza Calcica	506	591
Cl (ppm)	1925,6	1877,5
Sulfatos (ppm SO ₄)	30	20
Ca (ppm)	202	236
Bario (ppm)	6	7

Fuente: ECOPEPETROL S.A.

2.3.4 Vertimiento. Debido a las grandes cantidades de agua que se producen diariamente en el Campo, hay un excedente de este recurso que no se utiliza en las obras civiles, ni en la inyección para recobro y debido a esto se debe disponer de diversas formas.

Las aguas residuales industriales tratadas son trasladadas a sistemas de tratamiento de las estaciones de bombeo y tratamiento del Campo para ser vertidas al río Guayuriba o inyectadas en los pozos disposal. En la **Tabla 10** muestra los vertimientos vigentes del Campo Castilla.

Tabla 10. Vertimiento del recurso hídrico.

VERTIMIENTO	CAUDAL	ESTADO VIGENCIA	TIPO DE FUENTE
Rio Guayuriba	1.564 L/Seg 849312 BWPD	Vigencia hasta 2022	Subterránea
Reinyección (Pozos Disposal)	147,21 L/Seg 80.505 BWPD	Vigencia hasta 2019	Unidad K2

Fuente: Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), ECOPETROL
*A cada pozo disposal se le inyecta el mismo caudal.

La cuenca del río Guayuriba tiene su origen en los parques nacionales naturales de Sumapaz y Chingaza, en donde nace el río que se conoce como Blanco-Negro-Guayuriba hasta su desembocadura en el río Metica. Esta sección abarca un área de 353.166 ha y una longitud de 118,45 km. En la **Figura 7** se muestra la ubicación del río Guayuriba.

Figura 7. Cuenca del rio Guayuriba



Fuente: UNIVERSIDAD DE LOS LLANOS. La huella hídrica en nuestras cuentas, Guayuriba, 2015.

2.4 CANTIDAD DE AGUA EXCEDENTE PARA IMPLEMENTAR EN EL PROYECTO

Aun siendo el agua utilizada en todos los métodos y procesos de reutilización anteriormente descritos, sobra una porción de agua producida que actualmente el Campo solo tiene almacenada en los tanques y se utiliza para otro tipo de actividades como lo son el riego en las instalaciones del Campo y limpieza mecánicas de vías bajo normativas impuestas por los entes de control ambiental.

Aproximadamente para estas actividades hay un excedente de 13.136 BWPD, cantidad que se aprovecharía para implementar el proyecto, para un mayor aprovechamiento de este recurso.

3 .PARÁMETROS DICTADOS PARA LA REUTILIZACIÓN DEL AGUA EN PROCESOS AGRÍCOLAS SEGÚN LA RESOLUCIÓN 1207 DEL 2014

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de este trabajo es diseñar un modelo de ingeniería para la gestión del agua excedente del campo Castilla a fin de disponerla en cultivos que generan biocombustibles, a continuación se presenta la normativa dispuesta por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo mediante la resolución 1207 en Julio del 2014 para adoptar las disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas con el fin de proteger las riquezas naturales de la Nación y planificar el uso y aprovechamiento del agua para la conservación y restauración del recurso hídrico que es fundamental y básico para el desarrollo sostenible.

3.1 OBJETIVO

La resolución 1207 del 2014 tiene como objetivo establecer las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos.

3.2 REÚSO

El reúso del agua residual contribuye a una solución ambiental, capaz de reducir los impactos negativos de la extracción y descarga a cuerpos de aguas naturales por lo que la presente resolución tiene como objetivo disponer otros métodos de reutilización para el uso del agua residual tratada.

Cuando el usuario receptor es el mismo usuario generador, se requiere efectuar la modificación de la Concesión de Aguas, de la Licencia Ambiental o el plan de manejo Ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de Aguas.

Cuando el usuario receptor es diferente que el usuario generador, este último deberá presentar para el trámite de modificación de la concesión de aguas, permiso de vertimientos, licencia ambiental o plan de manejo ambiental, y el suministro de las cantidades (volumen o caudal) de agua requeridas para satisfacer la concesión que está sujeta a la disponibilidad definida por parte del usuario generador.

3.3 CRITERIOS DE CALIDAD

El proyecto se enfoca en el agua residual tratada y su uso en el sector agrícola, lo cual, se estipula de la siguiente manera conforme a la Resolución 1207 del 2014:

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo ambiental.
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.

- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- **Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburantes) incluidos lubricantes.**
- Cultivos forestales de maderas, fibras y otros no comestibles.
- Cultivos alimenticios que no son de consumo directos para humanos y animales y que ha sido sometidos a procesos físicos y químicos.
- Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
- Jardines en áreas no domiciliarias.

Una mención especial merece el uso de aguas residuales en el riego de cultivos para obtención de biocombustible. La producción de etanol y diésel ha tenido un gran crecimiento en Colombia, lo cual ha impulsado el aumento de las áreas cultivadas de caña de azúcar y palma de aceite, en lo cual se requiere de una gran demanda del recurso hídrico si además se tiene en cuenta que la mayor parte estos cultivos están localizados en sectores con poca disponibilidad de agua. Por lo tanto, el proceso de riego en el que se enfoca el proyecto es en los cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburantes) incluidos lubricantes donde deberá cumplir previamente los siguientes criterios de calidad.

Tabla 11. Propiedades fisicoquímicas del agua residual tratada para el uso agrícola.

VARIABLE	UNIDADES DE MEDIDA	VALOR LIMITE MAXIMO
FISICOS		
Ph	Unidades de PH	6,0 - 9,0
Conductividad		1.500,0
MICROBIOLOGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas / L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes / L	1,0
Salmonella sp	NMP/100 mL	1,0
QUIMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
Iones		
Cianuro Libre	mg CN°/L	0,2
Cloruros	mg Cl°/L	300,0
Fluoruros	mg F°/L	1,0
Sulfatos	mg SO ₄ ^{2°} /L	500,0

Tabla 11. (Continuación)

VARIABLES	UNIDADES DE MEDIDA	VALOR LIMITE MAXIMO
Metales		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Niquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
Metaloides		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
No Metales		
Selenio	mg Se/L	0,02
Otros Parámetros		
Cloro Total Residual	mg Cl ₂ /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	5,0

Fuente: COLOMBIA.MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207 del 2014. (25, julio,2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas.

3.4 DISTANCIAS MÍNIMAS DE RETIRO PARA EL DESARROLLO DEL REÚSO

Además de cumplir con los criterios de calidad para el reúso, se debe cumplir con las siguientes distancias mínimas de retiro al momento de efectuar la actividad de reúso:

- 90 metros medidos desde la línea de mareas máximas o la del cauce permanente de todo cuerpo de agua superficial hasta el perímetro de las áreas de aplicación.
- 90 metros de radio medidos desde los pozos y aljibes de agua subterránea hasta el perímetro de las áreas de aplicación.
- 30 metros de radio medidos desde cada punto de aplicación en aquellas áreas con acceso de personal, si el riego es realizado por aspersion durante el lapso que dure esta actividad²².

3.5 PREVENCIÓN Y RIESGOS

Con el fin de obtener de la Concesión de Aguas y el uso de aguas residuales tratadas, el Usuario Receptor deberá presentar para evaluación de la autoridad ambiental competente un documento en el que se definan las medidas y actividades a ser desarrolladas para prevenir el deterioro del recurso hídrico. En el documento se debe incluir el Estudio de Análisis de la Vulnerabilidad Intrínseca Detallada de los Acuíferos a la Contaminación para el uso Agrícola, cuando las actividades productivas en las que se realice el reúso se efectúen en áreas superiores a quinientas (500,0) hectáreas.

El Usuario Receptor que realizará actividades de reúso para el uso agrícola, debe entregar a la Autoridad Ambiental competente como parte de la documentación a ser aportada para la obtención de la Concesión de Aguas el grado de restricción aplicable en términos de:

- Salinidad.
- Sodicidad.
- Toxicidad, según la Resolución IDEAM 0062 de 2007

Igualmente, deberá realizar el análisis y reporte de los resultados de los siguientes parámetros:

- Relación de Absorción de Sodio (RAS). [4,52]
- Porcentaje de Sodio Posible (PSP). [42,9]
- Salinidad efectiva y potencial. [5,89] [2,38]
- Carbonato de sodio residual. [0,0]
- Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅. [20,9]

²² COLOMBIA.MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución 1207 del 2014. (25, julio,2014). Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas. Pág. 9

Los riesgos asociados al reúso en el sector agrícola tienen que ver con la salinidad en el agua residual para riego, debido a que produce deficiencia en los cultivos, degradación progresiva de los suelos y problemas de contaminación de las aguas subterráneas; este proceso tiene lugar porque el sodio cuando está presente en el suelo es intercambiable por otros iones.

El calcio y el magnesio son cationes que forman parte de los complejos estructurales que forman el suelo generando una estructura granular apropiada para los cultivos. El exceso de iones de sodio desplaza el calcio (Ca) y magnesio (Mg) y provoca la dispersión y desagregación del suelo. El suelo se vuelve duro y compacto en condiciones secas y reduce la infiltración de agua y aire a través de los poros que conforman el suelo.

Además, el exceso de sodio produce sequedad o quemaduras en los bordes exteriores de las hojas, el exceso de cloruros suele manifestarse con quemaduras en la punta de las hojas y los síntomas de toxicidad por boro se manifiestan en las plantas por un color amarillo en las puntas de las hojas más antiguas²³.

La presente Resolución se puede ver en el **ANEXO A**.

3.6 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE PROPIEDADES FISCOQUÍMICAS DEL AGUA PRODUCIDA

En la **Tabla 12** se realiza la comparación de las propiedades fisicoquímicas del agua expuestas por la Resolución 1207 del 2014 que permite irrigar dicha agua en los Cultivos para la generación de Biocombustible, con las propiedades fisicoquímicas del agua residual tratada en la Estación de bombeo de Acacias, esto con el fin de analizar y determinar si los parámetros establecidos por la resolución cumplen para el riego del agua.

²³ COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Dirección de Gestión Integral de Recurso hídrico, Bogotá, julio de 2016

Tabla 12. Comparación de propiedades fisicoquímicas del Agua producida.

VARIABLE	UNIDADES DE MEDIDA	VALOR LIMITE MAXIMO Resolución	ESTACIÓN ACACIAS	CUMPLE / NO CUMPLE
FISICOS				
pH	Unidades de PH	6,0 - 9,0	6,9	CUMPLE
Conductividad	Us/Cm/°C	1.500,00	409	CUMPLE
MICROBIOLÓGICOS				
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)	1,6*E(+4)	CUMPLE
Enterococos Fecales	NMP/100 MI	1,0*E(2)	0,00*E(00)	CUMPLE
QUÍMICOS				
Fenoles Totales	mg/L	1,5	0,32	CUMPLE
Hidrocarburos Totales	mg/L	1	< 0,41	CUMPLE
Iones				
Cianuro Libre	mg CN°/L	0,2	<0,010	CUMPLE
Cloruros	mg Cl°/L	300	81,5	CUMPLE
Fluoruros	mg F°/L	1	0,45	CUMPLE
Sulfatos	mg SO ₄ ^{2°} /L	500	7,94	CUMPLE
Metales				
Aluminio	mg Al/L	5	0,104	CUMPLE
Berilio	mg Be/L	0,1	0,003	CUMPLE
Cadmio	mg Cd/L	0,01	<0,005	CUMPLE
Cinc	mg Zn/L	3	<2,5	CUMPLE
Cobalto	mg Co/L	0,05	<0,04	CUMPLE
Cobre	mg Cu/L	1	<0,430	CUMPLE
Cromo	mg Cr/L	0,1	<0,1	CUMPLE
Hierro	mg Fe/L	5	1,432	CUMPLE
Mercurio	mg Hg/L	0,002	<0,002	CUMPLE
Litio	mg Li/L	2,5	2,1	CUMPLE
Manganeso	mg Mn/L	0,2	0,0858	CUMPLE
Molibdeno	mg Mo/L	0,07	<0,0107	CUMPLE
Niquel	mg Ni/L	0,2	<0,1	CUMPLE
Plomo	mg Pb/L	5	<0,822	CUMPLE
Sodio	mg Na/L	200	58,14	CUMPLE
Vanadio	mg V/L	0,1	0,0007	CUMPLE
Metaloides				
Arsénico	mg As/L	0,1	0,0005	CUMPLE

Tabla 12. (Continuación)

VARIABLE	UNIDADES DE MEDIDA	VALOR LIMITE MAXIMO Resolución	ESTACION ACACIAS	CUMPLE/ NO CUMPLE
Boro	mg B/L	0,4	0,38	CUMPLE
No Metales				
Selenio	mg Se/L	0,02	<0,004	CUMPLE
Otros Parámetros				
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	5	<0,11	CUMPLE

Fuente: elaboración propia.

Según lo analizado en la **Tabla 12** se determina que todos los componentes establecidos por la resolución 1207 del 2014 cumplen con los parámetros requeridos para la irrigación del agua en los cultivos para la generación de Biocombustible.

4 .GENERALIDADES DE LOS CULTIVOS DE PALMA Y CAÑA UTILIZADOS EN LA GENERACIÓN DE BIOCOMBUSTIBLES

A continuación, se dan a conocer las principales características de los biocombustibles: qué son, cómo se hacen, usos, entre otros aspectos que se deben conocer sobre el tema.

4.1 CULTIVOS DE PALMA DE ACEITE

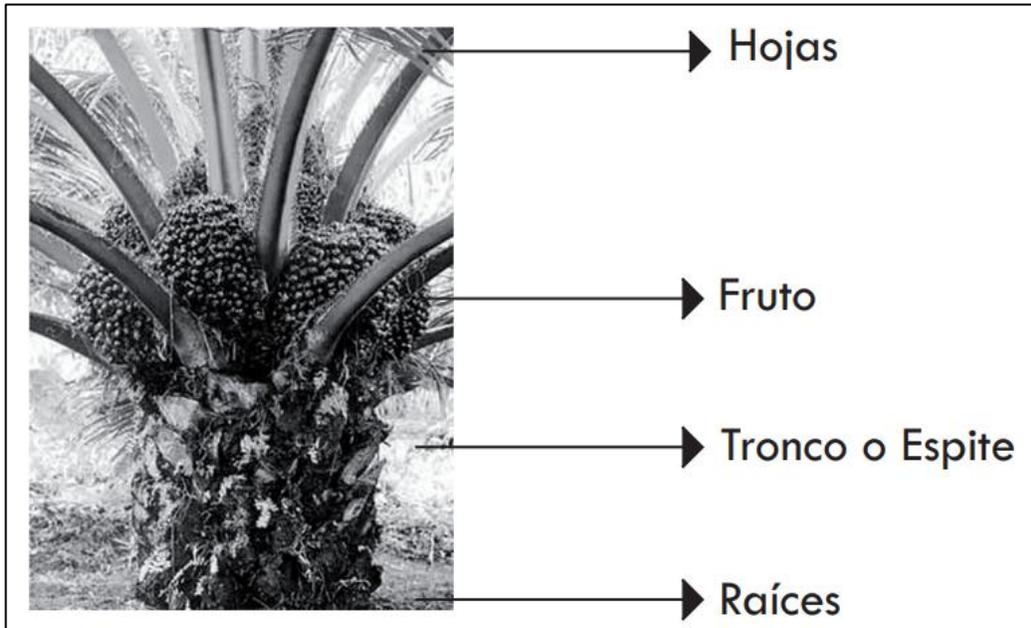
La palma de aceite es una planta de climas cálidos, se desarrolla aproximadamente dentro de los 500 metros a nivel del mar, este cultivo es perdurable, pausado y de largo rendimiento, su vida productiva puede durar más de 50 años, pero entre los 22 y 25 años se empieza a dificultar por la altura de los tallos y además es la oleaginosa más productiva del planeta, una hectárea sembrada produce entre 6 y 10 veces más aceite que las demás. Colombia es el cuarto país más productor de palma en el mundo y el primero en América. Para agosto del 2018 el país contaba con 516.981 hectáreas sembradas de las cuales 430.884 estaban en producción y 86.077 en desarrollo. Estas hectáreas generaban 1'627.552 toneladas de aceite de palma crudo²⁴.

4.1.1 Origen del sector palmicultor en Colombia. En el año 1958 se inició un proyecto de diversificación de cultivos con la palma africana liderado por el Instituto de Fomento Algodonero. El director de oleaginosas perennes realizó diversos estudios a lo largo del país y sus terrenos con el fin de ubicar los sitios óptimos para la siembra de la Palma de aceite, siendo el principal favorecido el municipio de Santander. A partir de 1975 se desarrolla un proceso de crecimiento con la siembra de 500 hectáreas por año.

4.1.2 Características de la palma. La palma está compuesta principalmente por 4 parte: hojas ,fruto,tronco y raíces que se muestran en la **Figura 8**.

²⁴ FEDEPALMA. Con récord en producción de aceite de palma, sector palmero colombiano cierra 2017 con balance positivo. Bogotá, 21 de diciembre de 2017. [En línea]. Consultado en 27 de mayo del 2019. Disponible en : <http://web.fedepalma.org/con-record-en-produccion-de-aceite-de-palma-sector-palmero-colombiano-cierra-2017-con-balance-positivo>.

Figura 8. Palma de Aceite.



Fuente: MUJICA, Carolina. Evolución del sector palmicultor. Bucaramanga .2016.[En línea] .Consultado en 15 de mayo de 2019.Disponible en: shorturl.at/pyFM1

- **Tronco o estipe:** puede alcanzar hasta 30 m de longitud
- **Hojas:** tienen una longitud de 5 a 7 m, con 200 a 300 folios en dos planos diferentes. El peciolo es de aproximadamente 1,5 m de largo y se ensancha en la base.
- **Fruto:** es ovoide, tiene de 3 a 5 cm de largo, está dividido en: estigma, exocarpo, mesocarpo o pulpa, endocarpo o cuesco, endospermo o almendra y embrión.

Figura 9. Fruto de la Palma de Aceite.



Fuente: MUJICA, Carolina. Evolución del sector palmicultor. Bucaramanga .2016.[En línea] .Consultado en 15 de mayo de2019.Disponible en: shorturl.at/bJNY9

4.1.3 Metodología de extracción del aceite de palma. Existen principalmente 6 procesos requeridos para extraer el aceite de palma desde la cosecha del fruto hasta la obtención del producto final.

- **Cosecha:** la cosecha se realiza de forma manual, según el grado óptimo de madurez del fruto que posee tres características principales:
 - a) Fruto maduro: es pardo rojizo en la parte superior y rojo anaranjado en la parte inferior con color de pulpa anaranjado
 - b) Cuando un racimo de frutos (por lo menos 20) se puede separar con la presión de los dedos, esto significa que está maduro
 - c) Cuando se observa que al racimo se le han caído al menos 20 frutos.

- **Esterilización:** en este proceso los frutos se someten a un tratamiento térmico. Se utiliza vapor de agua para esterilizarlos con una presión de 2.5 a 3.0 Kg/cm² a temperaturas mayores de 45°C durante 45 minutos. Ese proceso se realiza con el fin de eliminar las enzimas degradadoras de aceite y provocar que la pulpa se ablande.

- **Desgranado:** la finalidad de este proceso es separar los frutos de los tallos, se realiza mediante varios golpes manuales hasta lograr el desprendimiento.

- **Macerado:** durante esta etapa la pulpa del fruto se desprende del coco o semilla. Mediante un molino de dientes se rompen las células aceitosas de la pulpa y es así como el aceite se puede extraer con mayor facilidad mediante el prensado.

- **Prensado** : la pulpa tiene un espesor que puede variar entre 4 y 8 mm y además está conformada por un gran número de celdas minúsculas ,también está recubierta con una corteza externa .Las celdas presentes tienen una forma irregular y además contienen aceite y están pegadas entre si por medio de un cemento intercelular , este cemento se soluble solamente en agua muy caliente(95-100°C) y por lo tanto este conjunto de la pulpa se puede desintegrar en grupos de celdas de aceite en la medida que este cemento se disuelva, en este proceso de prensado se extrae.
- **Centrifugación:** el aceite obtenido en el prensado es centrifugado a 4300 rpm durante un minuto con el fin de eliminar todas las impurezas y las fibras excedentes de los procesos inferiores. El agua y los lodos pesados salen por las boquillas de la prensa y el aceite (producto final) y los lodos livianos se depositan en el centro y son descargados mediante un tubo recolector llamado “recuperador“.

4.2 CULTIVOS DE CAÑA DE AZUCAR.

La caña de azúcar se cultiva prácticamente en todas las regiones tropicales y subtropicales de la tierra. En Colombia se cultiva en forma productiva desde el nivel del mar hasta alturas superiores a los 2.000 metros en las más variadas condiciones de temperatura, luminosidad, precipitación y calidad de suelos.

Aunque la cosecha de la planta se realiza aproximadamente cada año (en las regiones cálidas), su rápida capacidad de rebrote permite varias cosechas sucesivas a partir de la siembra inicial. En nuestro país las renovaciones del cultivo se realizan entre cada cuatro y ocho años y es común encontrar en las zonas paneleras cultivos con más de 20 años de establecidos. Al ser un cultivo perenne permite una captura permanente del recurso tropical más abundante, la luz solar, disminuye los costos y los riesgos asociados a la siembra en los cultivos semestrales y anuales y mantiene una cobertura constante sobre el suelo lo que disminuye los costos de control de malezas y permite un uso más eficiente del agua y un mejor control de la erosión.

La caña de azúcar está constituida básicamente por agua y carbohidratos. Los carbohidratos se hayan presentes en forma tanto insoluble en agua (la fibra) como soluble (sacarosa, glucosa, fructuosa). Los contenidos de cenizas, lípidos (extracto etéreo) y proteína son prácticamente despreciables.

Para la agroindustria azucarera y panelera la sacarosa presente en la planta de la caña es el elemento que finalmente saldrá al mercado, ya sea en forma de azúcar o en forma de panela. Por lo tanto, el cultivo de la caña, sus prácticas agronómicas y los programas de mejoramiento genético, han estado encaminados hacia la selección de variedades que produzcan mayores niveles de sacarosa por

unidad de área. La sacarosa constituye aproximadamente el 50% del total de la materia seca del tallo maduro de la caña de azúcar²⁵.

4.2.1 Historia de la caña en Colombia. Según Víctor Manuel Patiño en su libro "Esbozo Histórico sobre la Caña de Azúcar": "La caña vino a Colombia en el año 1538 a través del puerto de Cartagena y dos años después en 1540 entró por Buenaventura al valle geográfico del río Cauca, plantándose inicialmente en la margen izquierda del río Cauca, en Arroyohondo y Cañas Gordas, lugares muy cercanos a Cali, donde operaron sendos trapiches paneleros". Según Patiño, la penetración en el resto del país se hizo a partir de María La baja en Bolívar; Valle de Apulo, Rionegro y Guaduas en Cundinamarca; Valle de Tensa en Boyacá y Vélez en Santander. Hacia 1560 se fundaron tres ingenios a orillas del río Amaime: el de San Jerónimo, perteneciente a Gregorio de Astigarreta, y los otros dos, uno a Andrés y otro a Lázaro Cobo. Hubo también un ingenio en Caloto, propiedad de Francisco de Belalcázar. Los hermanos Cobo exportaron azúcar y miel a Panamá en 1588. Más tarde, en 1593, Diego Ordóñez de Lara exportó 180 arrobas, por valor de dos pesos sencillos la arroba. En el año 1600 ya existían ingenios en Ocaña, Vélez, Mahates, Tocaima, Gaitara, La Palma, Ibagué, Buga, Cali y otras regiones del país.

En 1700 se incrementó el uso de derivados de la caña para la fabricación de aguardiente y desde 1772 se fundaron fábricas del licor (reales) en diversas ciudades del país. Entre 1930 y 1933 llegó la variedad POJ 2878 que hoy persiste en gran proporción en todas las zonas cañicultoras de Colombia, por recomendación de la Misión Chardón procedente de Puerto Rico.

Los ingenios Mayagüez, Providencia, Incauca, Risaralda y Manuelita establecieron destilerías para producir etanol desde finales del año 2005, como respuesta a la ley 693 de 2001 que obliga oxigenar la gasolina vehicular con 10% en volumen de alcohol carburante producido a partir de biomasa²⁶.

4.2.2. Características de la caña. La caña se divide en tres partes principalmente:

Raíces. Son las que se proporcionan el anclaje a la planta, absorben los alimentos y el agua del suelo, se dividen en dos:

- **Raíces de estaca original:** son delgadas, ramificadas y viven hasta dos o tres meses de edad

²⁵ FINAGRO, Producción de caña, 2018.[En línea].Consultado en 26 de mayo de 2019 .Disponible en: https://www.finagro.com.co/sites/default/files/node/basic-page/files/3_cana_produccion.docx

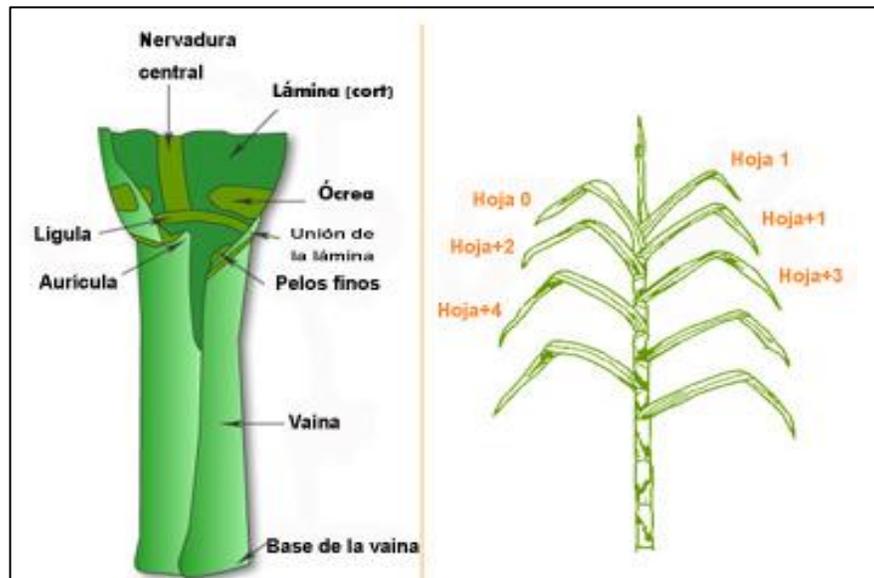
²⁶ CENICAÑA. Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia. Historia de la caña. [En línea]. Consultado en 25 de mayo del 2019 . Disponible en: http://www.cenicana.org/quienes_somos/agroindustria/historia.php.

- **Raíces permanentes:** son numerosas, gruesas, de rápido crecimiento y proliferan con el desarrollo de la planta de acuerdo con la variedad, factores ambientales, tipo de suelo y humedad.

Tallo: es la parte aprovechable industrialmente puesto que allí se almacenan los azúcares, está formado por nudos que dependen de la variedad. La altura y la longitud dependen de las condiciones agroecológicas y del manejo.

A continuación, en la **Figura 10** se muestra las partes principales de la Caña de Azúcar

Figura 10. Caña de Azúcar.



Fuente: MUJICA, Carolina. Evolución del sector palmicultor. Bucaramanga .2016.[En línea] .Consultado en 15 de mayo de 2019. Disponible en: <http://www.udi.edu.co/images/investigaciones/publicaciones/libros/porter/08/Libro-EvoluciondelSectorPalmicultor.pdf>

4.3 BIOCOMBUSTIBLES

Son combustibles producidos a partir de productos vegetales, como caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha azucarera, maíz, madera y celulosa, para producir etanol y, de los aceites vegetales de palma, girasol, soya y colza, entre muchos otros, y de grasas y sebo de origen animal, para producir biodiesel. Los biocombustibles son biodegradables, razón por la cual son amigables con la naturaleza y actualmente Colombia cuenta con los dos tipos de biocombustible.

4.3.1 Alcohol Carburante (Etanol) en Colombia y sus ventajas ambientales. El etanol combustible es un alcohol etílico con fórmula C_2H_5OH que se produce debido a la fermentación por levaduras de azúcares que están presentes en los jugos extraídos de la caña de azúcar, y en los almidones contenidos en la yuca, el maíz y otros granos. Después de realizar la fermentación, el producto resultante es sometido a varios procesos culminando con su destilación para retirar el exceso de agua y adecuarlo al uso como combustible motor. Al mezclarse con gasolina, se tiene que indicar esta mezcla con la letra E y el porcentaje respectivo. Actualmente Colombia es el tercer país productor de bioetanol en América latina y se mezcla E8 en el centro-oriente del país y, en el occidente, E10, exceptuando la zona fronteriza con Venezuela.

El bioetanol producido en Colombia ayuda a mitigar los efectos del calentamiento global, debido a que reduce las emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con los combustibles fósiles, esto ayuda a mejorar la calidad del aire en las ciudades. Al suscribir el protocolo de París, Colombia se comprometió a reducir las emisiones de dióxido de carbono en un 20% para el 2030, y el bioetanol contribuye en este propósito, debido a que, según el análisis de ciclo de vida, el producto colombiano reduce en un 74% las emisiones de gases de efecto invernadero. Otro de los beneficios de este combustible es el aumento del octanaje de la gasolina, lo que reduce la necesidad de utilizar gasolina, especialmente en las ciudades de menor altitud, lo cual permite una mejor operación de los motores y el ahorro de combustible.

4.3.2 Biodiesel en Colombia. Es un combustible biodegradable que se puede utilizar mezclado con el diésel petrolero o puro, descubierto por el profesor Expedito Parente de la Universidad Federal de Ceará, Brasil, en 1977, resultante de la reacción de un ácido graso vegetal o animal, con un alcohol –etanol o metanol– en presencia de un catalizador, generalmente, hidróxido de potasio o de sodio.

Similar al metanol, se identifica la mezcla con diésel petrolero, con la letra B, seguida del porcentaje mezclado. En Colombia, actualmente, se mezcla B7 en el centro-oriente del país y, en el resto, B10, con excepción de las zonas de frontera con Venezuela, país que exporta a Colombia, en condiciones especiales, los combustibles fósiles que allí se consumen.

Actualmente en Colombia hay una producción de 513.221 toneladas de aceite para generar biodiesel, el cual debe ser mezclado en un porcentaje de 10% en el combustible que se comercializa en todo el país. El presidente del gremio de los productores de biocombustibles asegura que el biodiesel reduce a un 83% de las emisiones contaminantes.

5. MODELO DE INGENIERÍA PARA LA GESTIÓN DEL AGUA TOMANDO EN CUENTA LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA, TRANSPORTE, UBICACIÓN Y MANEJO CON EL FIN DE DISPONERLA EN LOS CULTIVOS DE PALMA Y CAÑA

En este Capítulo se describe la topografía de la zona por donde se propone pasar el diseño de la tubería, haciendo un análisis de la elevación, distancia de recorrido, y los puntos de conexión. Así mismo se hace la selección de trazado para determinar las intersecciones que generan algún tipo de obstrucción del paso de la tubería.

Adicionalmente se determina la capacidad de transporte donde se hace una breve descripción de la tubería seguido de las ecuaciones más utilizadas para calcular el diámetro de diseño, con sus respectivos cálculos de caídas de presión. Finalmente se hace una selección de la bomba que ayude a dar potencia al fluido y con esto optimizar la capacidad requerida de transporte a través de la tubería.

5.1 TOPOGRAFIA

Esta sección tiene como finalidad realizar una descripción minuciosa del relieve terrestre por donde se propone extender la línea de flujo. Este análisis se realiza mediante el uso de métodos de cartera topográfica y de altimetría. Con la ejecución de estos métodos se podrá hacer una revisión de la realidad física de la zona de interés, la cual se verá plasmada en planos y perfiles para posteriormente ser analizados en pro de elegir los posibles trazados de la línea de flujo.

5.1.1 La cartera topográfica. Es un conjunto organizado de los datos geográficos de interés que son obtenidos mediante el levantamiento en campo o el aprovechamiento de sistemas de información geográfica. Este conjunto de datos sirve para realizar el dibujo de planos o perfiles del terreno de interés²⁷.

Mediante software satelital Google Earth se generó un trazado de 8,92 km entre la Estación de Bombeo de Acacias y la empresa Palmeras del Llano S.A, lugar donde se ubican los Cultivos de Palma. Esta última es una empresa Agroindustrial dedicada al cultivo de palma de aceite, producción de aceite y comercialización de sus subproductos. Los datos de dicha cartera topográfica se obtuvieron dividiendo el tramo de 8.920 m en 20 tramos equidistantes de 446 m lo cual generó un total de 21 puntos para los cuales se obtuvieron datos de longitud, latitud y elevación. (Ver **ANEXO B**).

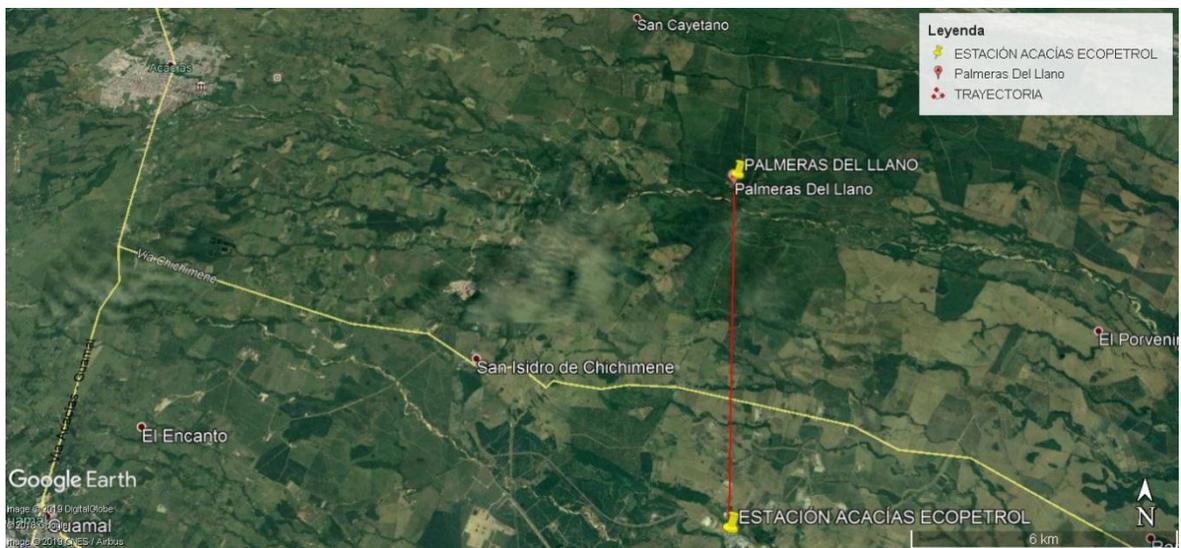
5.1.2 Altimetría. La altimetría es una rama de la topografía que se encarga de la medición y determinación de elevaciones o diferencias de nivel entre diversos puntos en un terreno. Estas mediciones no son más que distancias en sentido

²⁷ Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Conceptos y definiciones básicas. Bogotá; 2004 .Pag 9-17.

vertical referenciadas desde un plano horizontal. Para el tramo de 8,92 km trazado entre la Estación de Bombeo de Acacias y la empresa Palmeras del Llano S.A, nuevamente se utilizó el software satelital Google Earth, de donde se obtuvieron los datos de elevación para cada uno de los 21 puntos derivados de la cartera topográfica mencionados anteriormente. El software permite realizar la gráfica correspondiente al perfil de elevación de la totalidad del trazado realizado.

El procedimiento para generar el perfil de elevación con los datos respectivos de altimetría se realiza de la siguiente manera: Primero se debe tener una ruta trazada en Google Earth. Dicha ruta consiste en la unión de una serie de puntos previamente establecidos. Entre más puntos se tengan, más detallado va a resultar el perfil, dado que por cada punto hay un dato de elevación. Como ya se mencionó anteriormente, la ruta presentada tiene un total de 21 puntos que se encuentran espaciados entre sí cada 446 m. La ruta dentro del software quedó representada como se muestra en la **Figura 11**.

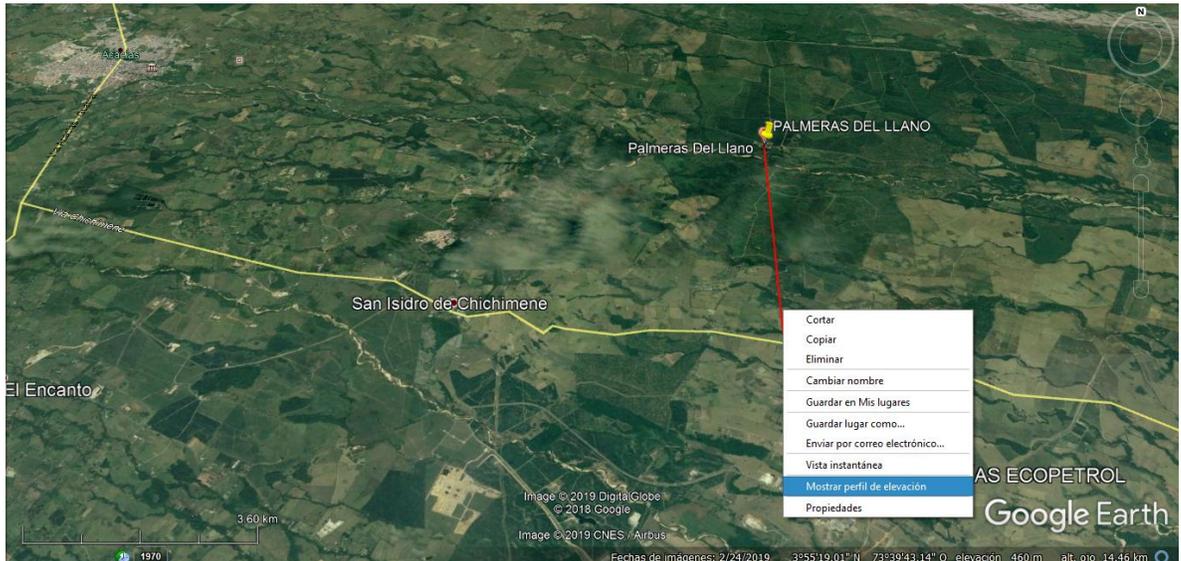
Figura 11. Mapa topográfico.



Fuente: Google Earth. Recorrido en línea recta Palmeras del Llano- Estación de bombeo Acacias. Disponible en: shorturl.at/byFPZ2019

Una vez se tiene el trazado de la ruta, el segundo paso consiste en desplegar el menú contextual sobre el trazado de la ruta y seleccionar la opción “Mostrar perfil de elevación”. Como se observa en la **Figura 12**.

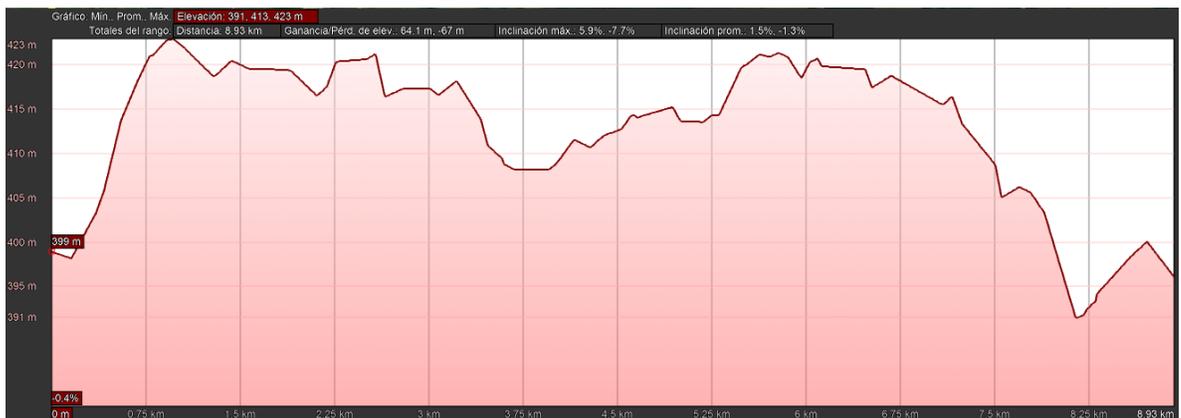
Figura 12. Menú Contextual.



Fuente: Google Earth. Recorrido Palmeras del Llano-Estación Acacias Ecopetrol 2019. Disponible en: shorturl.at/byFPZ.

Una vez seleccionada dicha opción en la parte inferior de la ventana aparecerá el perfil de elevación de la ruta trazada (**Figura 13**). En este gráfico se puede observar en el Eje X la distancia de la ruta en metros, y en el Eje Y la elevación del terreno en metros. Adicionalmente con el cursor se puede navegar dentro del gráfico y observar la elevación y porcentaje de inclinación en cualquier punto de la línea.

Figura 13. Perfil Topográfico.



Fuente: Google Earth, Perfil topográfico Palmeras del Llano-Estación Acacias Ecopetrol. 2019. Disponible en shorturl.at/ruCM8.

5.1.3 Puntos de conexión. Tanto para la definición del corredor de interés y la misma selección del trazado es de vital importancia definir el punto de origen y el destino de la ruta del diseño de línea. Para este proyecto se ha definido el punto de conexión de origen la tubería del diseño de línea en la Estación de Bombeo Acacias, y la conexión del punto de destino es la empresa Palmeras del Llano S.A donde se ubican los Cultivos de Palma. En la **Tabla 13** se muestra las coordenadas geográficas tanto del punto de origen como del punto de destino del oleoducto Estación de Bombeo Acacias – Cultivos de Palma y Caña.

Tabla 13. Coordenadas punto de Origen y Destino.

PUNTOS		Coordenadas UTM (Zona 18 N)		Coordenadas Geográficas	
		X	Y	Latitud (N)	Longitud (O)
ORIGEN	Estación de bombeo Acacias	651841.24 m	428881.02 m	3°52'44.59"	73°37'56.85"
DESTINO	Palmeras del Llano S.A	652374.72 m	437989.97 m	3°57'41.14"	73°37'39.07"

Fuente: elaboración propia.

5.1.4 Selección de Trazado. Para la selección del trazado definitivo del diseño de línea se requiere de la identificación y evaluación de las características topográficas, ambientales, sociales, económicas y retos técnicos que están involucradas en el corredor de interés, esto se realiza con el fin de mitigar en lo máximo posible el impacto sobre dicho corredor y cumplir con la normativa que regula este tipo de proyectos²⁸.

En la **Figura 14** la circunferencia roja indica la intersección de la vía Chichimene, en la **Figura 15** la circunferencia roja indica la intersección de la vía Chichimene y vía Acacias - Dinamarca – Surimena y en **Figura 16** la circunferencia roja indica el cruce del rio Acacias del estudio topográfico En la **Tabla 13** se establecen las distancias a las que se encuentra cada intersección, las medidas son tomadas desde la estación de Bombeo de Acacias (punto de origen).

²⁸ GEOTECNOLOGIA S.A.S, Ing. Jaime Suarez Díaz, normas de ingeniería de oleoductos ecopetrol.2017.

Figura 14. Intersección Vía Chichimene.



Fuente: Google Earth, Ubicación de la Vía chichimene. 2019. Disponible en: shorturl.at/fkEJ5.

Figura 15. Intersección vía Acacias - Dinamarca – Surimena.



Fuente: Google Earth. Ubicación vía Acacias-Dinamarca-Surimena 2019 Disponible en: shorturl.at/yCILM.

Figura 16. Intersección río Acacias.



Fuente: Google Earth. Rio Acacias. 2019.
Disponibile en: shorturl.at/mtwDG .

En la **Tabla 14**, se identifica las distancias (Km) de intersección del trayecto partiendo desde la Estación de bombeo de Acacias hacia los Cultivos de Palmeras del Llano S.A

Tabla 14. Intersecciones en el Trayecto

INTERSECCIÓN	DISTANCIA (Km)
VÍA CHICHIMENE	3,07
VÍA ACACÍAS - DINAMARCA – SURIMENA	7,35
RIO ACACÍAS	8,38

Fuente: elaboración propia.

Para atravesar dichas intersecciones se deben seguir las normas NIO 0900, NIO 0901 y NIO 0903.

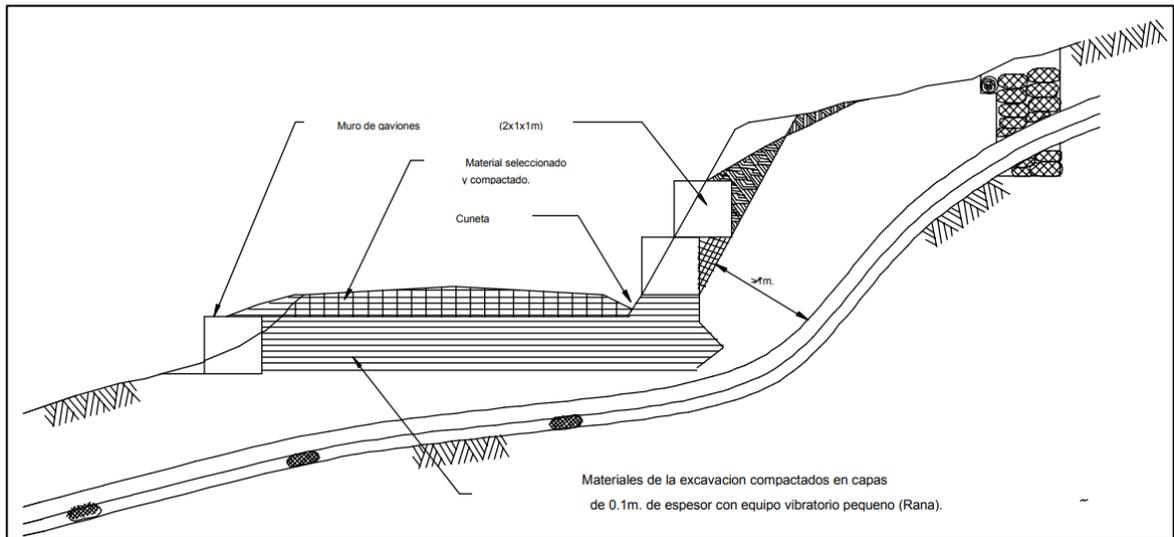
La Norma NIO 0900 reglamenta el paso de una línea de transferencia de hidrocarburos por zonas que ofrecen mayor dificultad para la construcción por sus condiciones naturales o por la presencia de obras civiles cuyo funcionamiento normal no debe alterarse; en estos tramos, el cruce de la línea requiere de un tratamiento especial, con el fin de proteger la tubería y las áreas aledañas²⁹. Los

²⁹ ECOPELROL S.A. NIO-0900. Normas de ingeniería de oleoductos. Julio del 2001.

requisitos mínimos de construcción para la tubería que pertenecen a este proyecto son los cruces de carreteras (NIO 0901) y los cruces de corrientes (NIO 0903).

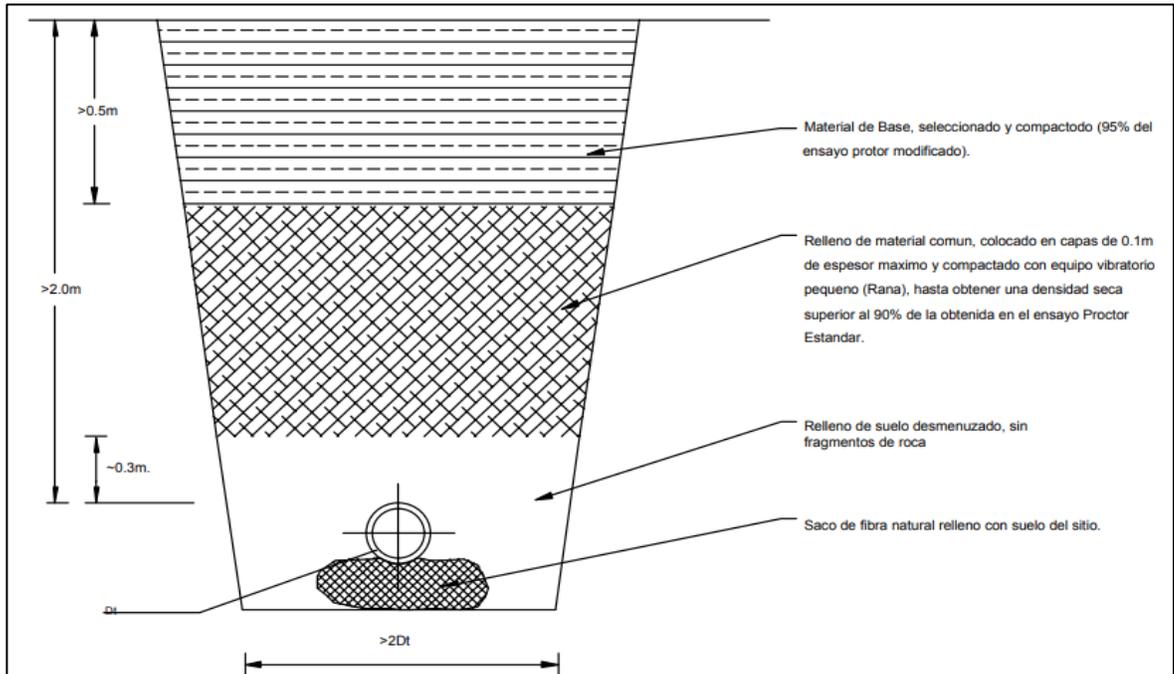
En la Norma NIO 0901 se establecen tres tipos de cruces a vías, el primero hace mención cuando el ducto atraviesa una vía principal, el segundo tipo de intersección que trata es el cruce con una ferrovía, y el tercer tipo de cruce es en vías secundarias el cual son aquellas carreteras intermunicipales, caminos vecinales y carreteras veredales con afirmado; no se incluyen los caminos "reales" ni de herradura. Los cruces de este tipo pueden realizarse a zanja abierta tal como se indica en la **Figura 17** y **Figura 18**. La tubería debe instalarse recta. Debe rellenarse la zanja inmediatamente después de bajar la tubería y su acabado y compactación deben ser, como mínimo, iguales a los existentes en la vía antes de construir la zanja.

Figura 17. Cruce de vías secundarias.



Fuente: ECOPETROL S.A. NIO-0901. Normas de ingeniería de oleoductos. Julio del 2001.

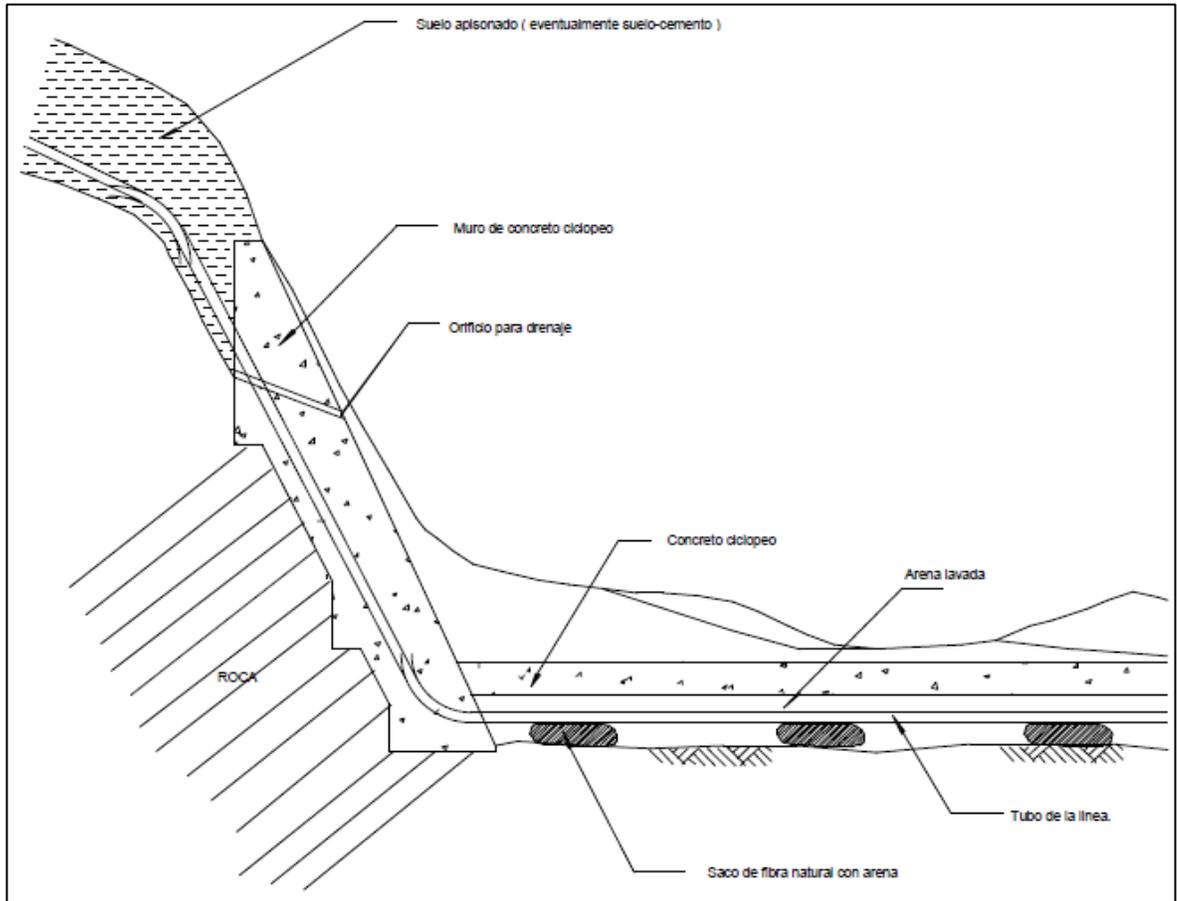
Figura 18. Esquema del relleno para cruces de vías secundarias.



Fuente: ECOPETROL S.A. NIO-0903. Normas de ingeniería de oleoductos. Julio del 2001.

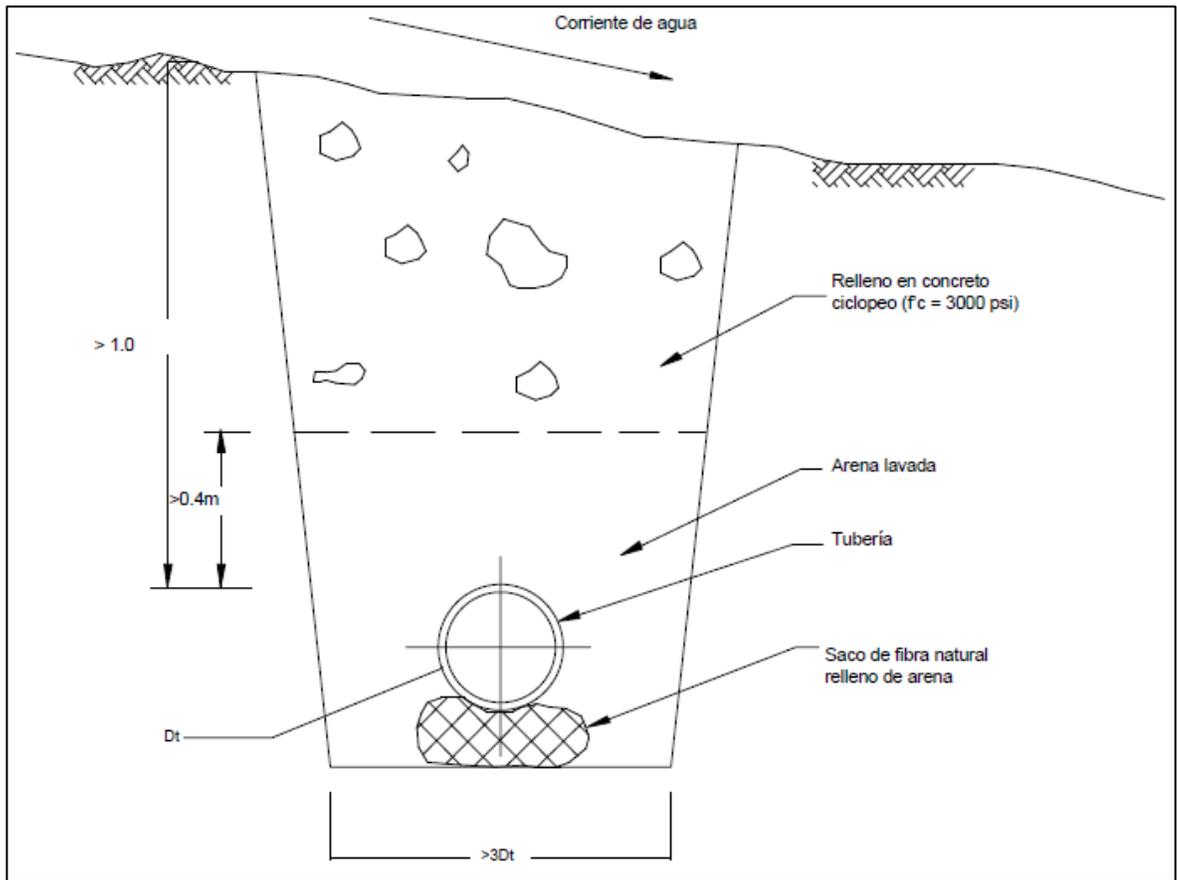
Por otro lado se debe realizar el cruce del Río Acacias, la norma divide estos tipos de cauces de corrientes en tres, los primeros son los cuerpos de agua principales los cuales deben tener un ancho de cauce superior a 30 m y el caudal promedio debe ser superior a $20\text{ m}^3/\text{seg}$, los siguientes cuerpos de agua a los que hace referencia la norma son considerados secundarios y estos hacen referencia a aquellos que tengan un ancho de cauce entre 10 y 30 m y su caudal promedio permanente es de $5\text{ m}^3/\text{seg}$, por último las corrientes menores son otros cuerpos hídricos diferentes de los ríos y quebradas. Para realizar el cruce la norma NIO 0903 establece el debido procedimiento, en este caso el modelo debe atravesar un afluente con un ancho de cauce 22 m con caudal promedio de $5,75\text{ m}^3/\text{seg}$; por lo tanto, el procedimiento del Contratista es enterrar la tubería a una profundidad mínima de 2 m para su instalación. Además, deben reconstruirse las márgenes del cauce con enrocados y materiales del sitio; eventualmente se pueden requerir gaviones como se muestra en la **Figura 19** y **Figura 20**.

Figura 19. Protección del lecho y las márgenes del cauce en roca.



Fuente: ECOPETROL S.A. NIO-0903. Normas de ingeniería de oleoductos. Julio del 2001.

Figura 20. Zanja en roca.



FUENTE: ECOPETROL S.A. NIO-0903. Normas de ingeniería de oleoductos. Julio del 2001.

5.2 CÁLCULOS DE LA INGENIERÍA DE DISEÑO

En este segmento se muestra el tipo de tubería a usar, la metodología del diseño y el costo de la materia prima.

5.2.1 Tubería. La tubería para usar en el proyecto es tubería de polietileno acuaflex de alta resistencia con tecnología de punta, como respuesta a las necesidades de suministro de agua, en las etapas de conducción, redes y conexiones, el cual proporciona tubosistemas para acueducto en PEAD (Polietileno de Alta Densidad) con los mejores beneficios.

Es comercializada en tramos de 6, 10 y 12 m o rollos de 50 o 100 m. Las uniones se realizan por termofusión o electrofusión, totalmente monolíticas, impidiendo la contaminación del agua conducida, así como la erosión de los suelos y el hundimiento de vías por exfiltraciones.

Las principales ventajas del uso de la Tubería Polietileno son:

- Mayores caudales por su coeficiente de fricción $C=150$ PE y $K_s=0.007$ (Darcy & Weisbach)
- Más fácil y rápido de instalar por su peso liviano. Tuberías en tramos de 6,10 y 12 m. y en rollos de 50 o 100 m. Tuberías con presión de trabajo hasta 230 psi. Tuberías de 16 mm hasta 400 mm.
- Tubería más económica que transportan un mayor volumen de agua que las tuberías convencionales. Obras más rápidas de ejecutar. Se minimiza el uso de accesorios.
- Amigable con el Medio Ambiente pues sus uniones por termofusión o electrofusión son totalmente monolítica, es decir, que impiden por tal motivo la contaminación del agua conducida. Además, también impiden la erosión de los suelos y el hundimiento de vías, debido a exfiltraciones.
- Sismo-Resistentes que por su flexibilidad tienen un excelente comportamiento en zonas altamente sísmicas.
- Vida Útil Mayor a 50 Años, Fabricadas con resinas químicamente resistentes a la acción agresiva de los suelos y aguas. Diseñadas para conducir fluidos a presión, a partir de un coeficiente de seguridad de diseño de 1,25 para las tuberías fabricadas con PE 100.

Este material garantiza la conservación de la calidad del agua para el consumo puesto que ha sido verificado de acuerdo a la norma ANSI/NSF 61:02 sin exceder los valores máximos de aluminio, antimonio, cobre, arsénico, bario, cadmio, cromo, plomo, mercurio, níquel, selenio y plata que establece el decreto 1575 de 2007 y la resolución 2115 de 2007.

El polietileno es un polímero obtenido por la polimerización del etileno: $CH_2=CH_2$. Es un polímero termostático del etileno producido a altas y bajas presiones y como resultado se obtienen familias de polímeros de alta y baja densidad, cada una de ellas con características diferentes de comportamiento y cualidades técnicas.

Las Tuberías de Polietileno para utilizar para la conducción de agua potable, se clasifican según la densidad, así: PE 40: Polietilenos de baja densidad. PE 80: Polietilenos de media densidad. PE 100: Polietilenos de alta densidad. Las resistencias hidrostáticas serán las de la **Tabla 15** de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana 4585 en lo referente las especificaciones de: 1. Diámetro exterior. 2. Espesor de pared. 3. Variaciones o tolerancias del espesor de pared.

Tabla 15. Propiedades y Características del PEAD Acuaflex.

Materia Prima					
CUADRO DE LOS MÉTODOS DE ENSAYO					
Características	Unidad	Valores			Método de Ensayo
		PE 40	PE 80	PE 100	
Densidad Compuesto	g/cm3	0.932	0.946 - 0.952	0.956 - 0.962	ASTM D - 1505 y/o ISO 1183
Melt Index (5 Kg)	g/10 minutos	0.3 a 0.6	0.3 a 0.6	0.3 a 0.6	ASTM D - 1238 y/o ISO 1183
Contenido de Negro de Humo	%	2.0 - 2.5	2.0 - 2.5	2.0 - 2.5	ISO 6964
Dispersión del Negro de Humo y/o Azul		≤3	≤3	≤3	ISO 11420 (N. Humo)
Estabilidad Térmica	minutos	≥15	≥15	≥20	ISO 13949 (Azul)
Designación (MRS)	Mpa	4 min	8 min	10 min	ISO 9080 / ISO 12162

Fuente: PAVCO .Manual técnico PEAD Acuaflex, Pág. 6, 2014.

5.2.2 Metodología del diseño del modelo. En primera instancia ECOPEPETROL S.A está dispuesta a asignar un caudal de 9.195 BWPD provenientes del Campo Castilla para el proyecto, el cual corresponde al 70% del excedente de agua producida, por otra parte, según Crane³⁰ la velocidad máxima recomendada para el agua en sistemas de bombeo y succión es de 2,1 metros por segundo (m/s). El diámetro de tubería que permite transportar el caudal anteriormente mencionado se calcula mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 1. Diámetro Interno de Tubería

$$D_{\text{interno}} = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * Vel}}$$

Fuente: CRANE.1977.Flujo de fluidos, Cap. 1, Pág. 5.

Donde:

D interno = diámetro interno de la tubería (m).

Q = caudal. (m3/ seg)

Vel = velocidad del fluido (m/ seg)

π = 3,1416.

1m³ = 6, 29 Bbl.

9.195 BWPD = 0,017 m³

³⁰ CRANE .1977. McGraw Hill .Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías; p. 3-10

Reemplazando los valores en la **Ecuación 1** se obtiene:

$$D_{interno} = \sqrt{\frac{4 * 0,017 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{\pi * 2,1 \left(\frac{m}{s}\right)}} = 0,1015 \text{ m}$$

El Diámetro Interno calculado teóricamente es de 0,1015 m. Debido a que este diámetro no es fabricado, se toma un diámetro de 141,00 mm o 0,141 m. Aplicando la **Ecuación 1** se realiza el despeje para calcular la nueva velocidad con la **Ecuación 2**.

Ecuación 2. Ajuste de la Velocidad.

$$Vel = \frac{4 * Q}{(D_{interno})^2 * \pi}$$

Fuente: Elaboración Propia.

$$Vel = \frac{4 * 0,017 \left(\frac{m^3}{s}\right)}{(0,141 \text{ m})^2 * \pi} = 1,0887 \frac{m}{s}$$

En conclusión, la tubería a usar en el proyecto es PE (polietileno) 100 / PN (peso nominal) 10 que trabaja a 23 °C y a una presión máxima de 10 bar o 145 Psi y maneja un RDE (Relación diámetro exterior/espesor mínimo) de 17.

Conociendo el Diámetro interno que es de 141,00 mm, es decir 5,5512 pulgadas, se determina que el diámetro nominal de la tubería (**Anexo C**) es de 160 mm o 6,29921 pulgadas. La **Tabla 16** muestra las características de la tubería especificadas para un diámetro nominal de 160 mm.

Tabla 16. Características de la Tubería.

Diámetro Nominal (mm)	Diámetro exterior promedio	Espesor de pared mínimo	Diámetro Interno (mm)	Presentación	Peso (Kg/m)
160	160	9,5	141,00	Tramo 12 m	4,57

Fuente: Manual técnico PEAD Acuaflex, Pág. 13, 2014.

Por otra parte, es necesario conocer el régimen de flujo del agua que pasará por la tubería, para este es preciso usar la ecuación del número de Reynolds expuesta de la siguiente forma:

Ecuación 3.Número de Reynolds.

$$Re = \frac{Vel * D}{\nu}$$

Fuente: CRANE.1977. Flujo de fluidos, Cap. 1, Pág. 5.

Donde:

Re = número de Reynolds (adimensional).

ν = viscosidad cinemática (m²/seg).

D = diámetro interno de la tubería (m).

Vel = velocidad del fluido (m/seg).

La viscosidad varía directamente con respecto a la temperatura, por tanto, según el manual técnico de tubosistemas de Polietileno acuaflex del 2014, la Viscosidad Cinemática a 30 °C es de 0,0080 cm²/seg, según la **Figura 21**.

Figura 21. Viscosidad Cinemática del Agua

Viscosidad Cinemática del Agua	
Temperatura	Viscosidad Cinemática
°C	cm ² /sg
0	0,0176
10	0,0131
12	0,0124
20	0,0100
30	0,0080
40	0,0066
60	0,0048
80	0,0036
100	0,0030

Fuente: Tuberías, Tomo 1 J.M. Mayol, 1997.

Esta temperatura es tomada con base al reporte de la Corporación para el desarrollo sostenible de área de manejo especial la Macarena “CORMACARENA” el cual nos indica que en la estación de Acacias la temperatura del agua que se

maneja es de 28°C, y una temperatura ambiente de 26,2 °C; adicionalmente la densidad del fluido corresponde a 994,9 Kg/m³. Reemplazando estos valores en la **Ecuación 3**:

$$Re = \frac{1,0887 \frac{m}{s} * 0,141 m}{(8 \times 10^{-7} \frac{m^2}{s})} = 191.883$$

El Número de Reynolds obtenido tiene un valor de 191.883, lo que nos indica que es un fluido Turbulento³¹. Con ese valor y el diagrama de Moody se determina el factor de fricción de la tubería, para ello se necesita conocer la rugosidad relativa de la tubería. En la **Figura 22** se muestra la Rugosidad Absoluta del tubo de polietileno el cual es de 0,0015 mm.

Figura 22. Rugosidad Absoluta de Materiales.

RUGOSIDAD ABSOLUTA DE MATERIALES			
Material	ε (mm)	Material	ε (mm)
Plástico (PE, PVC)	0,0015	Fundición asfaltada	0,06-0,18
Poliéster reforzado con fibra de vidrio	0,01	Fundición	0,12-0,60
Tubos estirados de acero	0,0024	Acero comercial y soldado	0,03-0,09
Tubos de latón o cobre	0,0015	Hierro forjado	0,03-0,09
Fundición revestida de cemento	0,0024	Hierro galvanizado	0,06-0,24
Fundición con revestimiento bituminoso	0,0024	Madera	0,18-0,90
Fundición centrifugada	0,003	Hormigón	0,3-3,0

Fuente: Crane, 1977, Flujo de fluidos, Cap. 1, Pág. 6. Rugosidad absoluta de materiales.

Para poder entrar en la gráfica de Moody, es necesario calcula la rugosidad relativa, la cual se define mediante la **Ecuación 4**:

³¹ Crane. 1977. McGraw Hill .Flujo de fluidos, Cap. 1, Pág. 4.

Ecuación 4. Rugosidad Relativa.

$$Rugosidad\ Relativa = \frac{Diametro}{Espesor} = \frac{D}{\epsilon}$$

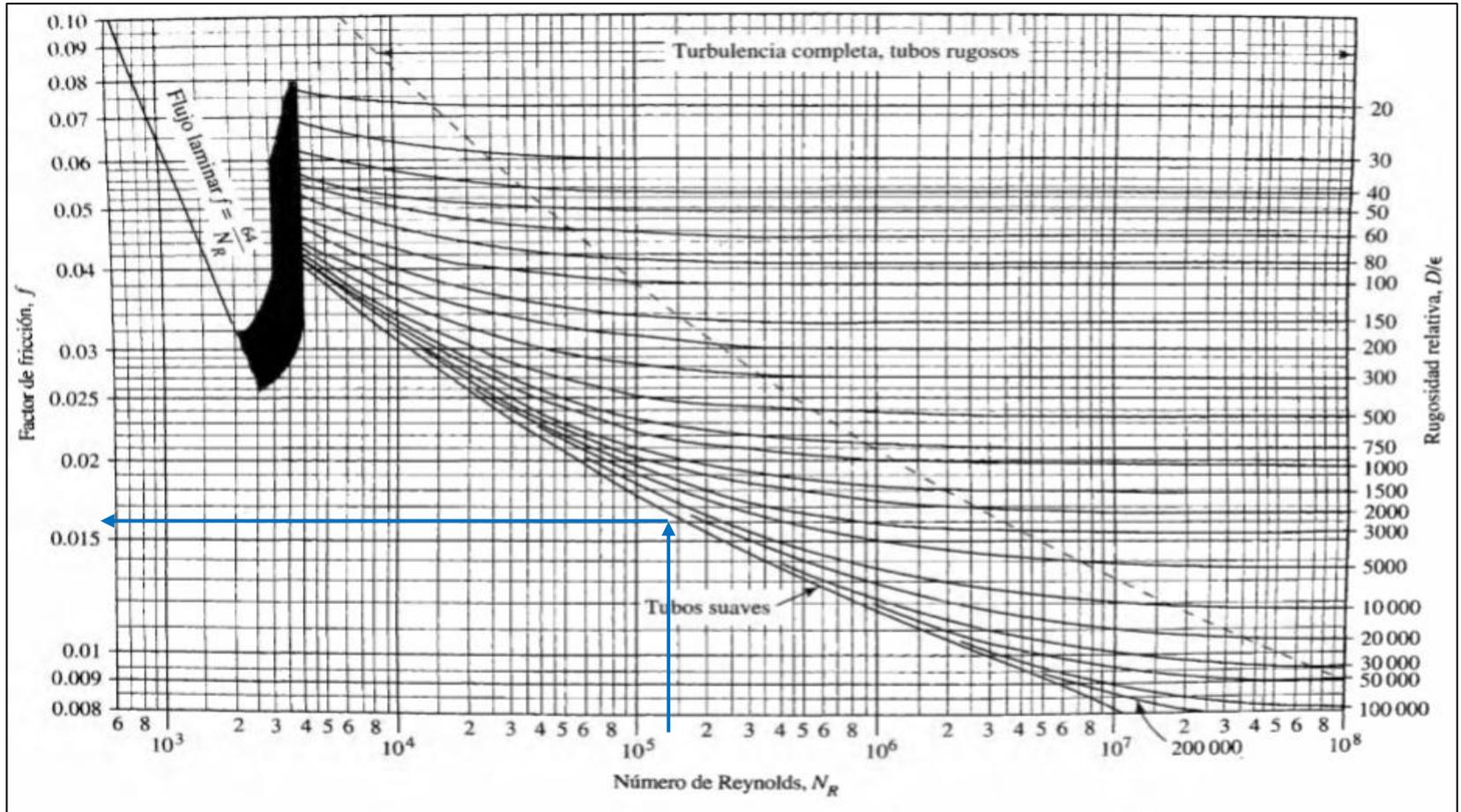
Fuente: Crane, 1977, Flujo de fluidos, Cap. 1, Pág. 6.

Reemplazando en la **Ecuación 4**:

$$\frac{D}{\epsilon} = \frac{141,00\ mm}{0,0015\ mm} = 94.000$$

Con los valores obtenidos del Número de Reynolds (191.883) y la Rugosidad relativa (94.000) se recurre al Diagrama de Moddy para hallar el factor de fricción (f); como se indica en la **Figura 23**.

Figura 23. Diagrama de Moddy.



Fuente: MOTT, Robert L. Mecánica de fluidos. 6ta edición. México Editorial Pearson.2006. ISBN 970-26-0805

Por lo cual según el diagrama de Moody indica que el Factor de fricción (f) es de 0,0153, conociendo este resultado podemos calcular la pérdida de carga por fricción según la ecuación de Darcy expresada de la siguiente manera:

Ecuación 5. Pérdidas de Presión (m).

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Fuente: CRANE. 1977. Flujo de fluidos, Cap. 1, Pág. 7.

Ecuación 6. Pérdidas de Presión (PSI).

$$\Delta P = f \frac{L V^2 * \rho}{D 2g}$$

Fuente: CRANE.1977. Flujo de fluidos, Cap. 1, Pág. 7.

Donde:

hf = Perdida por fricción

f = factor de fricción

L = longitud total de la tubería (m)

V = velocidad del fluido (m/seg)

D = diámetro interno de la tubería (m)

g = gravedad (m/seg²)

Reemplazando los valores en la **Ecuación 5** y **Ecuación 6** se obtiene:

$$hf = 0,0153 \left(\frac{8,920 \text{ m}}{0,141 \text{ m}} \right) \left(\frac{\left(\frac{1,0887 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2}{2 \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \right) = 58,47 \text{ m}$$

$$\Delta P = 0,0153 \left(\frac{8,920 \text{ m}}{0,141 \text{ m}} \right) \left(\frac{\left(\frac{1,0887 \text{ m}}{\text{s}} \right)^2 * \left(994,9 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right)}{2 \left(9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \right)} \right) = 58.174,68 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2}$$

$$\Delta P = 58.174,68 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^2} * \frac{1 \text{ m}^2}{10.000 \text{ cm}^2} = 5,82 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} = \mathbf{82,78 \text{ PSI}}$$

Otro de los factores que se tuvo en cuenta para el diseño del modelo de Ingeniería fueron las pérdidas de presión asociadas a las válvulas. Estas permiten controlar el sistema en caso de contingencia. En este modelo se necesita en total 8 válvulas, las cuales están distribuidas una al inicio y una al final de la tubería. Las seis válvulas restantes están ubicadas antes y después de cada intersección de cruce en las vías secundarias y en el cruce del río Acacias. Se seleccionan válvulas de bola debido a tres razones fundamentales: la primera, no es necesario regular el flujo sino detener el paso del fluido y son muy eficientes cuando se requiere apertura rápidamente; la segunda razón se debe a que son altamente resistentes y no reducen de forma alguna el diámetro o área efectiva por donde viaja el fluido y la tercera razón es que no son muy costosas, no necesitan mantenimiento constante y la probabilidad de fugas es casi nula³².

La combinación de estas características, especialmente de su flexibilidad y sistema de unión por termofusión, permite el uso exitoso en instalaciones sin zanja aplicable especialmente para rehabilitación o sustitución de redes existentes e instalaciones nuevas en que la condición de la superficie no permite la excavación a cielo abierto o simplemente para minimizar el impacto urbano que las instalaciones convencionales causan.

Un factor a tener en cuenta en este tipo de tubería es el Golpe de Ariete, que es cuando el flujo se detiene rápidamente, por ejemplo, al cerrar una válvula, la inercia se convierte en un incremento de presión. Entre más larga sea la línea y más alta la velocidad del líquido, mayor será la sobrecarga de presión. Estas sobrepresiones pueden llegar a ser lo suficientemente grandes para reventar cualquier tipo de tubería. Las Principales Causas de este Fenómeno son: 1. La apertura y el cierre rápido de una válvula. 2. El arranque y la parada de una bomba. 3. La acumulación y el movimiento de bolsas de aire dentro de las tuberías. Al cerrar una válvula, la sobrepresión máxima que se puede esperar se calcula así:

Ecuación 7. Sobrepresión máxima al cierre de la válvula.

$$P = \frac{aV}{g}$$

Fuente: PAVCO. Manual técnico PEAD Acuaflex.2014. 10 p.

Donde:

P: Sobrepresión máxima en metros de columna de agua, al cerrar bruscamente la válvula

a: Velocidad de la onda (m/s).

V: Cambio de velocidad del agua (m/s).

³²CRANE.1977. McGraw Hill Flujo de fluidos, Cap. 1, Pág. 6.

g: Aceleración de la gravedad = 9.81 m/s^2

Para hallar la velocidad de la onda (a), es necesario utilizar la siguiente formula:

Ecuación 8. Velocidad de Onda.

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + \left(\frac{K}{E}\right) (RDE - 2)}}$$

Fuente: Manual técnico PEAD Acuaflex, Pág. 10, 2014.

Donde:

K: Módulo de compresión del agua = $2.06 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$

E: Módulo de elasticidad de la Tubería = $1.4 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2$

RDE: Relación diámetro exterior/espesor mínimo = 17

$$a = \frac{1420}{\sqrt{1 + \left(\frac{2.06 \times 10^4 \text{ Kg/cm}^2}{1.4 \times 10^4 \frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2}}\right) (17 - 2)}} = 295,63 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Reemplazando en la **Ecuación 7** se obtiene:

$$P = \frac{295,63 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1,0887 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{9.81 \text{ m/s}^2} = 32,80 \text{ PSI}$$

El coeficiente de fricción para cada válvula es de $10^{.33}$. La ecuación que describe las pérdidas menores (por accesorios) se muestra a continuación.

³³ ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA AGRÍCOLA DE CIUDAD REAL; Cátedra de Ingeniería Rural; [En línea]. Consultado en 23 de mayo de 2019 Disponible en: https://previa.uclm.es/area/ing_rural/Trans_hidr/Tema8.PDF [Consultado 06/04/2019]; p. 2

Ecuación 9. Pérdidas de Presión por Accesorios (m).

$$hl = K \frac{vel^2}{2g}$$

Fuente: Crane 1977, Flujo de fluidos, Cap. 2, Pág. 10.

Ecuación 10. Pérdidas de Presión por Accesorios (PSI).

$$\Delta P = K \frac{vel^2 * \rho}{2g}$$

Fuente: Crane 1977, Flujo de fluidos, Cap. 2, Pág. 10.

Donde:

K = factor de fricción en el accesorio (adimensional).

Vel = velocidad del fluido (m/seg)

g = gravedad (m/seg²)

Reemplazando los valores en la **Ecuación 9** y **Ecuación 10** se obtiene:

- Cálculo de pérdida en m

$$hl = 10 * \frac{\left(1,0887 \frac{m}{s}\right)^2}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} = 0,5186 m$$

$$hl = 0,5186 m * 8 Válvulas = 4,1488 m$$

- Cálculo de pérdida en psi

$$\Delta P = 10 * \frac{\left(1,0887 \frac{m}{s}\right)^2 * \left(994,9 \frac{Kg}{m^3}\right)}{2 \left(9,81 \frac{m}{s^2}\right)} = 601,03 \frac{Kg}{m^2}$$

$$\Delta P = 811,58 \frac{Kg}{m^2} * \frac{1m^2}{10.000 cm^2} = 0,0601 \frac{Kg}{cm^2} = 0,8548 PSI$$

Como resultado las pérdidas por presión totales en el sistema son de 62.62 m o 83,63 PSI.

Conociendo las pérdidas de fricción se procede a hallar la presión requerida por la bomba para transportar el fluido desde la estación de bombeo de Acacias de ECOPELROL S.A hasta los cultivos de palma y caña de la empresa Palmeras del Llano, para ello se hace uso del principio de Bernoulli. El comportamiento de este principio se describe matemáticamente mediante la **Ecuación 11**.

Ecuación 11. Ecuación General de la Energía.

$$Z(a) + \frac{Vel(a)^2}{2*g} + \frac{P(a)}{\rho*g} + hb = Z(b) + \frac{Vel(b)^2}{2*g} + \frac{P(b)}{\rho*g} + hf$$

Fuente: CRANE.1977.Flujos de fluidos, Cap. 1, Pág. 7.

Donde:

Z = nivel con respecto a un marco de referencia (m)

Vel = velocidad de fluido (m/s)

P = presión en un punto (Pa)

g = gravedad (m/seg²)

ρ = densidad del fluido (kg/m³).

hf = pérdida de presión por fricción (m).

hb = cabeza de presión ejercida por la bomba (m)

Los puntos de referencia se encuentran en el punto de bombeo de la Estación de Acacias (a) y el punto de descarga son los cultivos de palma y caña (b); en el punto (a) la velocidad es nula debido a que el fluido no se encuentra en movimiento, la presión hidrostática es igualmente nula debido a que se toma a presión atmosférica, en el punto (b) la presión hidrostática es nula debido a que la descarga se realiza a presión atmosférica, la cota (z) se encuentra al nivel de referencia por tanto es igual a cero, la densidad del fluido (ρ) se desprecia porque es la misma en cualquier punto de la tubería. Con estas premisas la ecuación se reduce a los siguientes términos.

Cancelando términos de la **Ecuación 11**, se obtiene la siguiente operación:

Ecuación 12. Ecuación General de la Energía.

$$Z(a) + hb = \frac{Vel(b)^2}{2 * g} + hf$$

Fuente: Elaboración propia.

Donde:

Z(a) = nivel con respecto a un marco de referencia (m)

Vel = velocidad de fluido (m/s)

g = gravedad (m/seg²)

hf = pérdida de presión por fricción (m).

hb = cabeza de presión ejercida por la bomba (m)

Conociendo por el perfil topográfico que la diferencia de altura es de (-10 m) entre ambos puntos (a) y (b), la pendiente en todo el sistema es de 0,1%. Despejando y reemplazando los valores en la **Ecuación 13**, se obtiene que la presión requerida por la bomba hb para realizar el desplazamiento es:

Ecuación 13. Ecuación General de la Energía.

$$hb = \frac{Vel(b)^2}{2 * g} + hf - Z(a)$$

Fuente: Elaboración propia.

$$hb = \frac{(1,0887 \frac{m}{s})^2}{2 * 9,81 \frac{m}{s^2}} + 58,47 \text{ m} - (-10) = 68,53 \text{ Psi}$$

Lo que nos indica que la presión a la que debe ser sometido el fluido por la bomba es de 68,53 psi.

5.2.3 Selección de Bomba. Para la elección de la bomba es necesario conocer el caudal que será transportado por la línea de flujo y la presión necesaria para lograr fluir, siendo el caudal de 9.195 BWPD y la presión requerida por la bomba de 108,95 psi, la bomba elegida que cumple estos aspectos es la SERIE BA / MODELO 150-40 del fabricante EURO PUMP. En la **Tabla 17** se muestra la ficha técnica de la bomba.

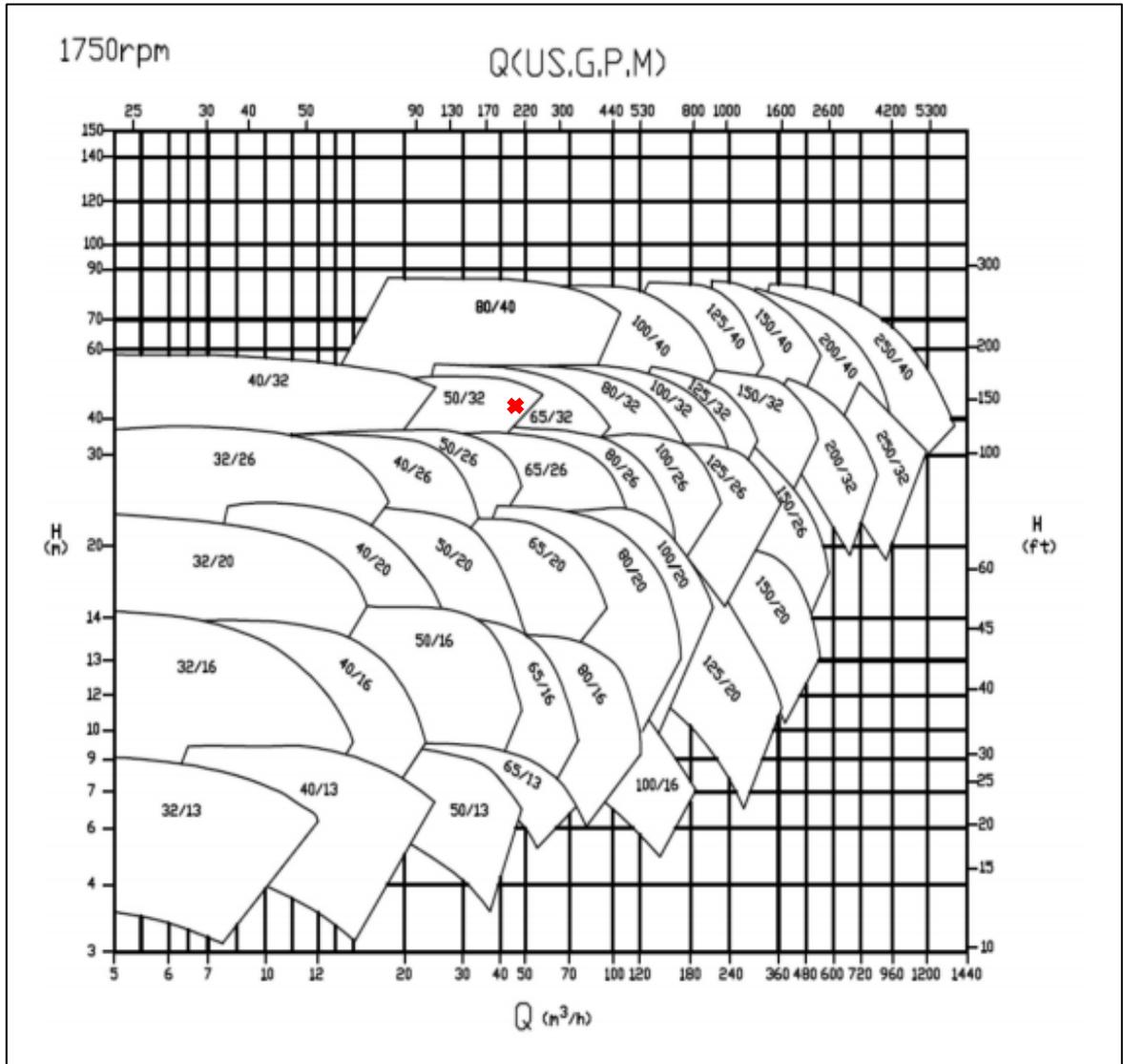
Tabla 17. Ficha Técnica de la Bomba EURO PUMP.

CAUDAL	Hasta 1.100 m³ / hr
CABEZA	Hasta 150 m
VELOCIDAD	Hasta 3.500 rpm
TEMPERATURA	Hasta 105 °C
PRESIÓN DE TRABAJO	Hasta 16 bar o 232 PSI
POTENCIA	50 HP

Fuente: Bombas BEYOND, Catalogo EURO PUMP BA. 2019.

En la **Figura 24** se observan las condiciones de trabajo de la bomba para el modelo, las cuales son 9.195 BWPD que equivale a 61,2 m³ / hr y 68,53 psi equivale a 48,35 m de cabeza.

Figura 24. Condiciones de trabajo de la Bomba.



Fuente: Bombas BEYOND, Catalogo EURO PUMP BA.2019.

- **Consumo de energía de la bomba**

Para conocer el consumo diario de energía por parte de la bomba se requiere realizar la conversión de los 50 HP de potencia que posee el motor. Para esto se multiplica por 0,735 que es el equivalente de 1 HP en kWh, esto da como resultado un consumo de 36,76 kWh.

5.3 COSTO DE LA MATERIA PRIMA

El diseño de la línea de flujo incide en costos de materia prima, la cual consta de 8,92 km de tubería PE 100 empleada en el proyecto, también el precio de las 8

válvulas que serán utilizadas como medio para controlar alguna contingencia asociada a los cruces de vías y cuerpos de agua, como también la bomba utilizada que es otro factor a tener en cuenta para el costo del proyecto. La compra de la tubería comercial se realiza por tramos de 12 m de longitud. En la **Tabla 18** se muestra la relación del precio por unidad y el precio total de la tubería.

Tabla 18. Relación de la Tubería.

TUBERIA	LONGITUD POR TRAMO	LONGITUD TOTAL	TOTAL DE TUBOS	PRECIO POR CADA TUBO (COP)	PRECIO TOTAL (COP)
PE 100 / PN 10 / RDE 17	12 m	8.920 m	744	\$ 60.784	\$45.223.296

Fuente: elaboración propia.

Los costos de exportación y nacionalización no son necesarios debido a que la empresa fabricante es nacional como lo es PAVCO, por tanto, los costos asociados a fletes de puerto y demás disposiciones no son necesarias.

Las válvulas utilizadas en el proyecto son válvulas de bola como se describe en la metodología del diseño, el precio de estas válvulas es de \$416.471 por unidad cotizado en la empresa TUVALREP S.A.S, se necesitan 8 válvulas de modo que al haber 3 cruces se deben emplear a ambos lados una válvula y otras dos válvulas a la entrada y salida de la tubería respectivamente; el costo total asciende a \$3.331.768.

Posteriormente para la instalación de la línea de flujo se cotiza a la empresa OBCIPOL LTDA el valor promedio para realizar la excavación de la zanja por donde pasará la tubería, dicho valor es de \$122.000.000 COP, el metro de excavación para el cruce del río Acacias tiene un costo de \$2.800.000, y el metro de excavación para las vías secundarias tiene un valor de \$1.900.000, dicha excavación tiene una duración de construcción estimada de 60 días. Como se determinó en el trazado de la línea de flujo, se deben realizar en total 3 cruces, siendo el primero el cruce en la vía Chichimene, el segundo cruce en la vía Acacias - Dinamarca - Surimena y el último cruce que pasa por el río Acacias. El método de pago para las perforaciones varía de acuerdo con la cantidad de metros que se debe perforar y con el diámetro externo de la tubería, también es necesario resaltar las condiciones del suelo, puesto que éste puede generar diferentes complicaciones al momento de perforar. Para el modelo propuesto la tubería seleccionada cuenta con un diámetro externo de 6.29921 in, la longitud total que debe llevar la perforación se observa en la **Tabla 19**.

Tabla 19. Longitud de Perforación.

INTERSECCIÓN	METROS POR PERFORAR
VIAS SECUNDARIAS	20 m
RIO ACACIAS	30 m

Fuente: elaboración propia.

Por otra parte, la bomba SERIE BA / MODELO 150-40 del fabricante EURO PUMP en un material de acero inoxidable tiene un costo de \$11.616.000.

El costo total de la construcción de la línea de flujo asciende a \$182.171.064

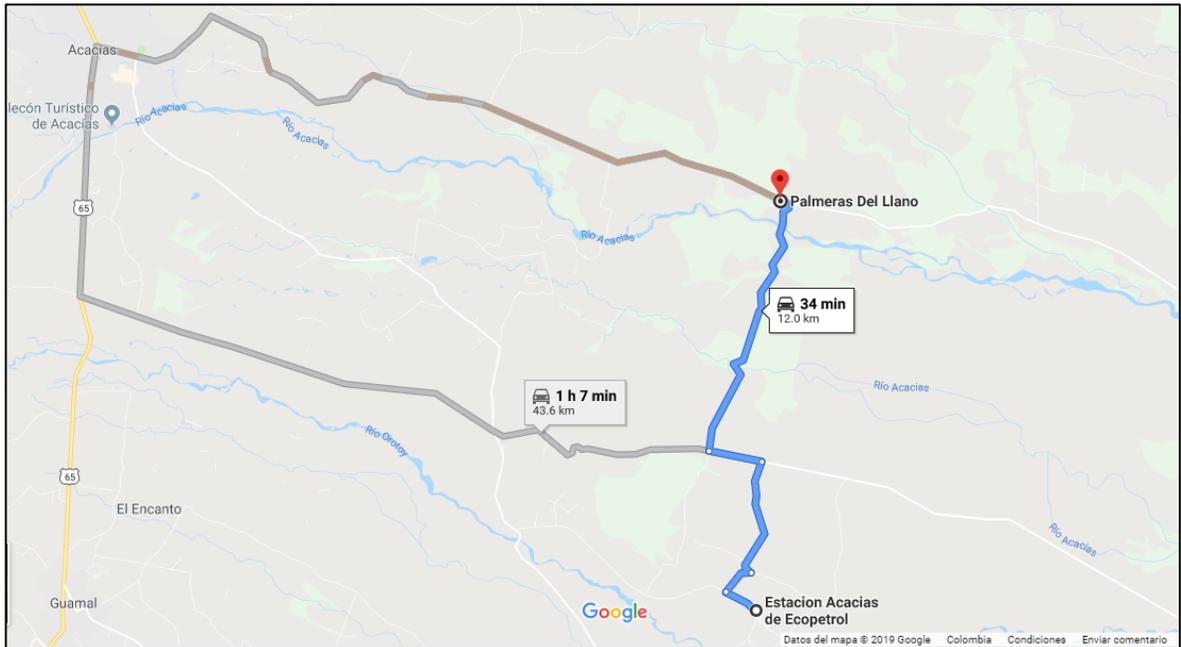
5.4 TRANSPORTE ALTERNATIVO.

En este segmento se evalúa una alternativa de transporte del agua por medio de camiones cisterna o carrotanques. Este medio es un buen tipo de transporte pues suministra de forma rápida e inmediata el agua a las zonas que lo requieran. Sin embargo, las operaciones de camiones cisterna son costosas y requieren de mucha dedicación de tiempo para organizar y administrar este tipo de distribución, además que las cantidades de agua que se pueden distribuir son limitadas. El suministro con camiones cisterna, requiere de una flota de vehículos que, a su vez, necesitan mantenimiento frecuente, combustible, choferes y una administración apropiada³⁴.

Los camiones cisterna llenos de agua son vehículos pesados y su operación puede requerir que las rutas estén en condiciones óptimas que posibiliten que los camiones accedan en tiempos adecuados. Para este caso la ruta que deberá hacer un camión cisterna se muestra en la **Figura 25**.

³⁴ Organización Mundial de la Salud, Suministro de agua mediante camión cisterna, Pag. 6,1

Figura 25. Trayectoria de Carrotanque.



Fuente: Google Maps.Ruta más rápida Palmeras del Llano -Estación Acacias de Ecopetrol .2019.Disponible en: shorturl.at/gjBFH.

De acuerdo con la **Figura 25** se logra evidenciar que el trayecto desde la Estación de bombeo de Acacias hasta la empresa Palmeras del Llano S.A donde se encuentra ubicado el cultivo de Palma de Aceite, la trayectoria del transporte del agua es de 12 km. Es decir que el agua tendrá que viajar en carrotanques por una distancia de 12 km y regresar para hacer un viaje, esto es importante destacarlo pues la mayoría de las operadoras cobran por la distancia que transportará y por el número de viajes que se deberá desarrollar.

Para conocer los costos a manejar se realizaron diferentes cotizaciones a tres empresas locales que se encargan del transporte del agua y cuentan con el concepto sanitario emitido por la Subred Integrada de Servicios de Salud E.S.E, que regula las características fisicoquímicas y microbiológicas del agua transportada, los carrotanques a usar tienen diferentes capacidades y dependiendo de esa capacidad varía el costo, estas empresas suministran elementos alternos como lo son mangueras, válvulas y motobomba.

En la **Tabla 20** se presenta los costos de cada viaje, dependiendo de la empresa y de la capacidad del carrotanque, teniendo en cuenta que las empresas cuentan con carrotanques de las mismas capacidades y que cada viaje representa el trayecto de ida y de vuelta.

Tabla 20. Costos por Viaje.

COSTO DE VIAJE POR EMPRESA		
CAPACIDAD (Bbl)	EMPRESA	COSTO POR VIAJE (COP)
90	ACUALIANZA	\$240.000
	ACUAEXPRESS	\$250.000
	COVOLCO	\$270.000
143	ACUALIANZA	\$320.000
	ACUAEXPRESS	\$340.000
	COVOLCO	\$380.000
238	ACUALIANZA	\$600.000
	ACUAEXPRESS	\$610.000
	COVOLCO	\$610.000

Fuente: elaboración propia.

Se elige la empresa ACUALIANZA S.A al tener el menor costo de cada una de las capacidades y con estos precios se realiza la evaluación de costos totales diarios, mensuales y anuales.

Tabla 21. Costos de la Empresa ACUALIANZA S.A.

CAUDAL POR TRANSPORTAR DIARIAMENTE (BWPD)	CAPACIDAD (Bbls)	NUMERO DE VIAJES REQUERIDOS DIARIAMENTE	COSTO DE VIAJE (COP)	COSTO TOTAL (COP)
9195	90	103	\$240.000	\$24.720.000
	143	65	\$320.000	\$20.800.000
	238	39	\$600.000	\$23.400.000

Fuente: elaboración propia.

En la **Tabla 21** se muestra el costo para el transporte del agua diariamente, y en esta se evidencia que la opción que genera menor costo es el carrotanque de capacidad de 143 Bbl con un total de 65 viajes diarios, el tiempo de viaje aproximado se estimó asumiendo que los vehículos se movilizan a una velocidad de 22 km/h en promedio, con este valor se hará la evaluación financiera.

5.5 VARIABLE QUE RELACIONA ÁREA CON CAUDAL

Para conocer la cantidad de agua requerida por cada hectárea en el cultivo de la palma de aceite de la empresa Palmeras del Llano S.A, es necesario saber que se cuenta con un área de 1.800 Ha, además de esto es necesario conocer el termino de Evapotranspiración que influye en el cálculo del caudal necesario.

Se conoce como Evapotranspiración (ET) la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo por evaporación y por otra parte mediante transpiración del cultivo. El valor teórico del Evapotranspiración en la palma de aceite es de 0,58 Lt/seg/Ha³⁵.

N_n = Necesidad Neta

Ecuación 14. Necesidad Neta de una Ha.

$$N_n = 0,58 \frac{\text{Lt/seg}}{\text{Ha}} * \frac{1 \text{ bbl}}{159 \text{ l}} * \frac{3.600 \text{ s}}{1 \text{ h}} * \frac{24 \text{ h}}{1 \text{ dia}} = 315,17 \frac{\text{bbl/dia}}{\text{Ha}}$$

Fuente: Elaboración propia.

El valor calculado nos indica la relación de cada hectárea, la cantidad de barriles por día que van a ser utilizados en la irrigación de todo el cultivo.

Teniendo en cuenta lo anterior se determina las Hectáreas posibles a irrigar con el Caudal disponible.

Ecuación 15. Ha a Irrigar.

$$\text{Ha a Irrigar} = \frac{\text{Caudal} \left(\frac{\text{Bbl}}{\text{Dia}} \right)}{N_n \left(\frac{\text{Bbl/dia}}{\text{Ha}} \right)}$$

Fuente: Elaboración propia, 2019

$$\text{Ha a Irrigar} = \frac{9.195 \left(\frac{\text{Bbl}}{\text{Dia}} \right)}{315,17 \left(\frac{\text{Bbl/dia}}{\text{Ha}} \right)} = 29,17 \text{ Ha}$$

Las Ha que se irrigan con el caudal disponible son 29,17 Ha, esto equivale al 1,62% del total de cultivos a irrigar.

³⁵ IDEAM, Evapotranspiración de referencia ET para Colombia. Diciembre 2017. [En línea]. Consultado en 27 de mayo de 2019. Disponible en: shorturl.at/dtGR2

5.5.1. Cálculo del valor del Barril de Agua. Teniendo en cuenta la Necesidad Neta que requiere una hectárea, se consulta a la empresa de Acueducto Aguas de Castilla S.A, a la cual la empresa Palmeras del Llano S.A. le compra el agua por un precio actual de \$10.010 COP por m³. Partiendo de este valor se determina los m³ por Ha que deben ser irrigadas diariamente.

Ecuación 16. Conversión de Nn a m³

$$\text{Conversion de Nn a m}^3 = \frac{1\text{m}^3 * \text{Nn}}{6,29 \text{ Bbl}}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Conversion de Nn a m}^3 = \frac{1\text{m}^3 * 315,17 \frac{\text{Bbl}}{\text{Ha}}}{6,29 \text{ Bbl}} = 50,11 \frac{\text{m}^3}{\text{Ha} * \text{Dia}}$$

Teniendo los m³ a irrigar y el precio de venta del agua por parte de Acueducto Aguas de Castilla S.A se calcula el precio de venta del agua por Ha.

Ecuación 17. Precio diario del agua por Ha.

$$\text{Precio diario del agua por Ha} = \left(\frac{\text{m}^3}{\text{Ha} * \text{Dia}} a \text{ irrigar} * \text{valor (COP) por m}^3 \text{ del acueducto} \right) + \text{Cargo Fijo de consumo}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\begin{aligned} \text{Precio diario del agua por Ha} &= \left(50,11 \frac{\text{m}^3}{\text{Ha} * \text{Dia}} * \$2.733 \text{ COP} \right) + \$10.348 \\ \text{Precio diario del agua por Ha} &= \$147.299 \end{aligned}$$

Ecuación 18. Precio del Agua por Día.

$$\text{Precio del Agua por Día} = \text{Ha a Irrigar} * \text{Precio del Agua por Ha}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Precio del Agua por Día} = 29,71 \text{ Ha} * \$147.299 = \$4.376.242$$

Conociendo el valor de agua por día que invierte la empresa Palmeras del Llano S.A, se calcula el valor que invierte la empresa por la compra del agua a un tiempo de 12 meses como esta pronosticado el proyecto, como se muestra en la **Tabla 22**.

Tabla 22. Inversión del agua.

PRECIO POR Bb (\$ COP)	TIEMPO (Meses)
128.901.355	1
257.802.710	2
386.704.065	3
515.605.420	4
644.506.775	5
773.408.129	6
902.309.484	7
1.031.210.839	8
1.160.112.194	9
1.289.013.549	10
1.417.914.904	11
1.546.816.259	12

Fuente: elaboración propia.

En la **Gráfico 3** se muestra los gastos de la compra del agua que tiene la empresa Palmeras del Llano S.A en un Tiempo de 12 meses.

Gráfico 3. Gastos de compra del agua.



Fuente: elaboración propia.

Se utiliza el concepto de eficiencia energética el cual se define como el uso eficiente de la energía, esto en busca de proteger el medio ambiente y reducir costos al usuario en un lapso. El proyecto permite reducir la cantidad de dinero de inversión en el tiempo y a este diferencial se le llama Ahorro. Se decide que para este proyecto la empresa Palmeras del Llano S.A tendrá un ahorro del 50% del total de inversión que equivale a \$1.546.816.259 para la compra del agua en un periodo de 12 meses, el 50% que se deja de invertir por parte de la empresa que equivale a \$773.408.129 anualmente le corresponde a Ecopetrol S.A y con este valor se realizan los cálculos para hallar finalmente el precio de venta que tiene el barril de agua.

Ecuación 19. Valor del Barril.

$$\text{Valor del Barril} = \frac{\text{Precio del agua por dia}}{\text{Caudal diario}}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\text{Valor del Barril ACUEDUCTO Aguas de Castilla S. A} = \frac{\$4.376.242}{9.195 \text{ Bbl/dia}} = \$475,94$$

$$\text{Valor del Barril ECOPETROL S. A} = \frac{\$2.148.350}{9.195 \text{ Bbl/dia}} = \$233,64$$

En la **Tabla 23** se muestra la comparación del precio unitario del barril vendido por el acueducto y el vendido por ECOPETROL S.A

Tabla 23. Comparación del Precio de Venta del Agua.

ACUEDUCTO Aguas de Castilla S. A	ECOPETROL S. A
\$475,94	\$233,64

Fuente: elaboración propia.

La **Tabla 23** nos indica que la compra del barril de agua se reduce en un 50% con Ecopetrol S.A siendo favorable y rentable para la empresa Palmeras de Llano S.A. Además, el proyecto tiene un tiempo de recuperación de la inversión de tres meses.

6. EVALUACIÓN FINANCIERA DEL MODELO DE INGENIERÍA MEDIANTE UN MODELO DE COSTO ANUAL UNIFORME EQUIVALENTE (CAUE).

El agua es una parte importante de la extracción y manejo de los hidrocarburos, el Campo Castilla produce 1.040.000 BWPD, esta es una cantidad considerable. Este recurso al estar presente en grandes cantidades a veces puede llegar a ser un problema para la industria pues se necesita tratar y disponer, generando unos costos adicionales, al crear este modelo se les da una alternativa a los métodos convencionales de disposición buscando así generar ingresos económicos adicionales con una inversión inicial, haciendo uso de este modelo en cultivos de palma y caña, mediante la construcción de una línea de flujo.

Después de conocer y analizar técnicamente las ventajas de la construcción de la tubería para la disposición del agua en los cultivos de palma, se obtuvo que este modelo permite aprovechar una gran cantidad de agua en lugar de disponerla sin que nos genere ningún beneficio. Para la evaluación de la viabilidad financiera del proyecto se utilizó como unidad monetaria de valor constante el Peso Colombiano (COP).

6.1 ANÁLISIS DE COSTO DE INVERSIÓN Y OPERACIÓN (CAPEX Y OPEX).

Estos costos se refieren a los costos e inversiones asociados con bienes físicos o activos necesarios para que la operación entre en funcionamiento, así mismo el costo relacionado con operaciones y servicios.

Se describirán dos escenarios en los cuales el escenario 1 abarcará todos los costos de inversión y operación relacionados con el diseño de la línea de flujo, y el escenario 2 reflejará los costos de operación del modelo con carrotanques, debido a que este no requiere inversión.

6.1.1 Línea de Flujo (Escenario 1). En este escenario se tendrá en cuenta los costos de inversión y operación en el Campo Castilla con una línea de flujo.

6.1.1.1 Costo de la tubería. Se muestra el cálculo del número de tubos requeridos para el tramo de 8.920 m y el costo respectivo, haciendo uso de la **Ecuación 20** y **Ecuación 21** respectivamente. Los resultados se resumen en la **Tabla 24**.

Ecuación 20. Número total de Tubos.

$$TOTAL DE TUBOS = \frac{LONGITUD}{TRAMO} = \frac{8.920 m}{12 m} = 744$$

Fuente: elaboración propia.

Ecuación 21. Precio Total de Tubería.

$$\text{PRECIO TOTAL DE TUBERIA (COP)} = \text{Total de tubos} * \text{Precio por cada tubo (COP)}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\text{PRECIO TOTAL DE TUBERIA (COP)} = 744 * \$ 60.784 = \$ 45.223.296$$

Tabla 24. Costo total de Tubería.

TUBERIA	LONGITUD POR TRAMO	LONGITUD TOTAL	TOTAL DE TUBOS	PRECIO POR CADA TUBO (COP)	PRECIO TOTAL (COP)
PE 100 / PN 10 / RDE 17	12 m	8.920 m	744	\$ 60.784	\$45.223.296

Fuente: elaboración propia.

*Todos los precios incluyen el IVA.

6.1.1.2 Costo de las Válvulas. Se muestra la cantidad de válvulas a utilizar, el precio por unidad y el precio total para la implementación de las válvulas.

Ecuación 22. Precio Total de Válvulas.

$$\text{PRECIO TOTAL DE VALVULAS (COP)} = \text{Número de Valvulas} * \text{Precio por cada Valvulas (COP)}$$

Fuente: Elaboración propia.

$$\text{PRECIO TOTAL DE VALVULAS (COP)} = 8 \text{ Valvulas} * \$416.471 = \$3.331.768$$

6.1.1.3 Costo de las bombas. Cotizada en la empresa BEYOND INDUSTRIAL LTDA la bomba de marca EURO PUMP SERIE BA / MODELO 150-40 en un material de acero inoxidable que cumple con los requisitos establecidos tiene un costo de \$11.616.000.

Ecuación 23. Costo de operación de la bomba

$$\begin{aligned} \text{Costo operación de la bomba} \\ = \text{kWh de consumo} * \text{tiempo de operacion diario (hrs)} * 365 \text{ dias} \\ * \text{valor unitario del kWh} \end{aligned}$$

Fuente: elaboración propia.

Costo operación de la bomba = 36,75 kWh * 24 hrs* 365 días * 230,09 COP/kWh
Costo operación de la bomba = 74.072.873,7

6.1.1.4 Costos asociados a la operación. Son los costos relacionados con la operación, en este caso la perforación o excavación de la zanja para la instalación de la tubería. Este costo involucra la mano de obra y toda la maquinaria necesaria para la excavación.

Ecuación 24. Precio de Excavación para el río.

$$\text{PRECIO DE EXCAVACIÓN río (COP)} = \text{Valor unitario por metro} * \# \text{ Metros a Perforar}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\text{PRECIO TOTAL DE EXCAVACIÓN río (COP)} = \$2.800.000 * 30 \text{ m} = \$84.000.000$$

Ecuación 25. Precio de Excavación para las vías.

$$\text{PRECIO DE EXCAVACIÓN vías (COP)} = \text{Valor unitario por metro} * \# \text{ Metros a Perforar}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\text{PRECIO TOTAL DE EXCAVACIÓN vías (COP)} = \$1.900.000 * 20 \text{ m} = 38.000.000$$

Ecuación 26. Precio Total de Excavación

$$\text{PRECIO TOTAL DE EXCAVACIÓN (COP)} = \text{PRECIO DE EXC río} + \text{PRECIO DE EXC vías}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\text{PRECIO TOTAL DE EXCAVACIÓN (COP)} = \$84.000.000 + \$ 38.000.000 = \$122.000.000$$

6.1.1.5 Costo total de la línea de flujo. Aquí se ve reflejado el costo total de la inversión.

Ecuación 27. Inversión Total del Proyecto.

$$\text{INVERSIÓN TOTAL} = \text{PRECIO TOTAL DE LA TUBERIA} + \text{PRECIO TOTAL DE VALVULAS} + \text{PRECIO DE LA BOMBA Y SU OPERACIÓN} + \text{PRECIO TOTAL DE EXCAVACIÓN}$$

Fuente: elaboración propia.

$$\text{INVERSIÓN TOTAL} = \$45.223.296 + \$3.331.768 + \$11.616.000 + \$122.000.000 + 74.072.873$$

$$\text{INVERSIÓN TOTAL} = \$256.243.937$$

6.1.2 Uso de Carrotanques (Escenarios 2). En este escenario se tendrá en cuenta los costos de operación en el Campo Castilla para el alquiler de carrotanques que permitan transportar el agua debido a que en este no se contemplan costos de inversión pues solo se contrata un servicio.

6.1.2.1 Costo de Alquiler. Se describe el valor del servicio prestado por la empresa ACUALIANZA S.A que corresponde al total de viajes calculados anteriormente para cumplir con el caudal establecido y satisfacer la necesidad.

Ecuación 28. Número de viajes requeridos diariamente.

$$\# \text{ DE VIAJES REQUERIDOS DIARIOS} = \frac{\text{CAUDAL atransportar}}{\text{CAPACIDAD por viaje}} = \frac{9195 \text{ BWPD}}{143 \text{ bbls}} = 65 \text{ Viajes}$$

Fuente: elaboración propia.

Ecuación 29. Costo Total de Carrotanque.

$$\text{COSTO TOTAL (COP)} = \# \text{ DE VIAJES REQUERIDOS DIARIAMENTE} * \text{COSTO DE VIAJE}$$

$$\text{COSTO TOTAL (COP)} = 65 \text{ Viajes} * \$320.000 = \$20.800.000$$

Fuente: elaboración propia.

6.2 EVALUACIÓN FINANCIERA DEL PROYECTO MEDIANTE CAUE.

El análisis financiero se realiza por medio del Costo Anual Uniforme Equivalente que permite tomar una decisión al momento de iniciar un proyecto, la rentabilidad que cada uno de los socios desea obtener por la inversión, el costo equivalente de la vida útil de un activo. El CAUE es una de las herramientas para convertir todos los ingresos y egresos en una serie de pagos anuales equivalentes vencidos, Se puede decir que el CAUE es cada una de las partes anuales iguales que se reparten en el VPN, a la tasa de descuento utilizada para calcularlo.

Se toma una Tasa Interna de Oportunidad (TIO) de 12% establecida por Aswath Damodaran para la evaluación de proyectos petroleros³⁶.

Ecuación 30. Tasa de Interés efectiva mensual.

$$\begin{aligned} \text{Tasa efectiva mensual} &= ((1 + \text{Tasa efectiva anual})^{\left(\frac{1}{12}\right)} - 1) \\ \text{Tasa efectiva mensual} &= (1 + 0.12)^{\left(\frac{1}{12}\right)} - 1 \\ \text{Tasa efectiva mensual} &= 0,00949 \end{aligned}$$

Fuente: BACA URBINA, Gabriel. Ingeniería financiera. 2013. Editorial patria.

Ecuación 31. CAUE para la Línea de Flujo.

$$\begin{aligned} \text{CAUE} &= \frac{-\text{Inv} + R * \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]}{\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]} \\ \text{CAUE} &= \frac{-256.243.937 - 15.180.922 * \left[\frac{(1 + 0,00949)^{12} - 1}{0,00949(1 + 0,00949)^{12}} \right]}{\left[\frac{(1 + 0,00949)^{12} - 1}{0,00949(1 + 0,00949)^{12}} \right]} = -31.314.491,27 \end{aligned}$$

Fuente: BACA URBINA, Gabriel. Ingeniería financiera. Editorial patria 2013.

³⁶ EVALUACIÓN DE PROYECTOS PETROLEROS, Costo de Capital por Sector.2014[En línea] .Consultado en 29 de mayo del 2019 .Disponble en http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/wacc.htm

Ecuación 32. CAUE para los carrotanques.

$$\text{CAUE} = \frac{-\text{Inv} + R * \left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]}{\left[\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right]}$$
$$\text{CAUE} = \frac{-7.488.000.000 - 624.000.000 * \left[\frac{(1 + 0.00949)^{12} - 1}{0.00949(1 + 0.00949)^{12}} \right]}{\left[\frac{(1 + 0.00949)^{12} - 1}{0.00949(1 + 0.00949)^{12}} \right]} = -1.287.157.826$$

Fuente: BACA URBINA, Gabriel. Ingeniería financiera. Editorial patria 2013.

6.3 ANÁLISIS FINANCIERO

Calculando el Costo Anual Uniforme Equivalente (CAUE) se evidencia cual es la mejor alternativa a implementar pues la selección se hace mediante la opción de menor costo, en este caso la opción más favorable es la del método mediante la línea de flujo. Teniendo en cuenta que se considera solo un ciclo de alternativa de 12 meses, esto supone que los costos en todos los periodos siguientes son iguales.

7. CONCLUSIONES

- De los diferentes métodos que tiene el Campo Castilla para el vertimiento de su agua residual, se analiza que el Rio Guayuriba es la opción que más se afecta, teniendo en cuenta que posee el mayor caudal de vertimiento entre los diferentes métodos para la disposición de este Campo.
- Se analiza que el agua de disposición luego de su tratamiento cumple con todas y cada una de las propiedades fisicoquímicas requeridas por la RESOLUCIÓN 1207 DEL 2014 para la utilización en la irrigación de los cultivos que producen Biocombustible.
- No hay una relación establecida entre la industria petrolera con el gremio agrícola que utiliza el recurso del agua residual, pues actualmente no existe un modelo que comunique los Campos Petroleros con los cultivos de irrigación.
- La tubería Acuaflex tiene un mejor desempeño en este proyecto debido a que, al ser flexible, se adapta a las diferentes elevaciones, y depresiones que se entran en el recorrido sin necesidad de implementar accesorios adicionales en la línea o cortes en los tramos de tubería. Las uniones se realizan por termofusión o electrofusión, totalmente monolíticas, impidiendo la contaminación del agua conducida, así como la erosión de los suelos y el hundimiento de vías por exfiltraciones.
- A partir del análisis del mapa cartográfico y altimetría se estableció que la distancia entre el origen y el punto de disposición es de 8,92 km, que la pendiente entre ambos puntos es de 0.1%, el total de puntos críticos equivale a tres. Estos últimos son las vías Chichimene y Acacias-Surimena, y el rio Acacias.
- Teniendo en cuenta el caudal asignado por ECOPETROL S.A equivalente a 9.195 BPD, el modelo de ingeniería establece que el diámetro interno de la tubería debe ser de 0,141 m y el diámetro exterior de 0,160 m.
- En cuanto a las características del fluido se estableció que la Temperatura del agua en el campo es de 28°C, la densidad del fluido es de 994,9 Kg/ m³ y el Re es de 191.883. Este último valor nos indica que el régimen de flujo es turbulento.

- Las características de la bomba deben suplir las necesidades de energía/potencia del modelo de ingeniería. Teniendo en cuenta lo anterior la capacidad de esta debe alcanzar como mínimo 108,95 psi de presión y un caudal de 0,017 m³ /s. La referencia de la bomba utilizada en el modelo es la SERIE BA / MODELO 150-40 del fabricante EURO PUMP, que tiene una presión de trabajo de hasta 232 psi y soporta un caudal máximo de 0,3055 m³ /s, por lo tanto, es adecuada para las necesidades del modelo.
- Las pérdidas por presión halladas en el modelo son 112,75 psi, este es un valor que se encuentra dentro del rango de operación de la tubería, el cual soporta una presión máxima de 145 psi, lo anterior indica que hay un rango aproximado de 32,25 psi para maximizar el rendimiento del modelo.
- Se determinó que el modelo del diseño de línea genera menores gastos a la empresa Palmas del Llano S.A. que el modelo de carrotanque debido a que disminuye el precio del barril de agua de \$475,94 COP a \$233,64 COP esto evaluado a un periodo de 12 meses para hacer su comparación equitativa.
- Se implementó un modelo económico bastante adecuado pues reduce en un 50% el precio del agua a partir de la eficiencia energética al calcular que sale más económico implementar un diseño de línea que una ruta de carrotanque, esto también genera menor impacto ambiental reduciendo emisiones atmosféricas.

8 .RECOMENDACIONES

- Determinar el costo de transporte en carrotanque utilizando vehículos de diferentes capacidades simultáneamente, con el fin de establecer si el valor es menor.
- Realizar un estudio a la variable que relaciona el caudal con el área para aumentar el número posible de hectáreas a irrigar.
- Se recomienda la adquisición de agua excedente de otros campos aledaños al Campo Castilla para dar mayor porcentaje de aprovechamiento de este recurso.
- Se recomienda investigar una ruta alternativa a la planteada sin necesidad de ser un recorrido en línea recta, en la cual se eviten los cruces de cuerpos hídricos y vías, debido a que estas necesitan una excavación y esto a su vez implica un mayor costo al proyecto.
- Realizar un análisis más minucioso de la altimetría y las condiciones topográficas del terreno por el cual se diseña la línea de flujo para tener una menor incertidumbre en cuanto a variables no deseadas en el momento de la construcción de la línea.

BIBLIOGRAFIA

ABC FINANZAS; Disponible en <https://www.abcfinanzas.com/administracion-financiera/valor-presente-neto>; Consultado [15/04/2019].

AGENCIA NACIONAL DE HIDROCARBUROS. Cuenca llanos Orientales: Integración Geológica de la digitalización y análisis de núcleo.

ANH, Colombian Sedimentary Basins: Nomenclature, Boundaries and Petroleum Geology, a New Proposal. 2007.

Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA), ECOPETROL S.A, Resolución 293 del 18 de marzo de 2016.

Bombas BEYOND, Catalogo EURO PUMP BA. 2018.

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, Cenicaña, Disponible en: http://www.cenicana.org/quienes_somos/agroindustria/historia.php.

CHEVRON, ECOPETROL. Campo Castilla- Chichimene. 2016. p 4-5.
COLOMBIA. MADS; Resolución 1207 de 2014.

CRANE; Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.

ECOPETROL S.A, Historial de producción de petróleo y agua del Campo Castilla desde 1976 a 2017, Meta 2018.

ECOPETROL S.A, Procesos de Separación, Tratamiento y Disposición de la producción del Campo Castilla, Meta 2018.

ECOPETROL S.A. NIO-0900. Normas de ingeniería de oleoductos. Julio del 2001.

ECOPETROL S.A. NIO-0901. Normas de ingeniería de oleoductos. Julio del 2001.

Ecopetrol S.A.; REVISTA FUENTES: EL REVENTÓN ENERGÉTICO.

ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA AGRÍCOLA DE CIUDAD REAL; Cátedra de Ingeniería Rural;

EVALUACIÓN DE PROYECTOS PETROLEROS, Aswath Damodaran; Disponible en http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/wacc.htm 31
Finagro, Producción de caña

Geotecnología S.A.S, Ing. Jaime Suarez Díaz, normas de ingeniería de oleoductos Ecopetrol.

IDEAM, Evapotranspiración de referencia ET para Colombia.
Ingeniería financiera, Gabriel Baca Urbina, 2016.

INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION.
Compendio de normas para trabajos escritos. NTC-1486-6166 Bogotá D.C.: El
instituto,2018.ISBN 9789588585673 153 p.

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Conceptos y
definiciones básicas Bogotá; 2004:9-17.

Manual técnico PEAD PAVCO Acuaflex, 2014.

MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE, Resolución 1207
del 2014.

MOTT Robert L. Mecánica de fluidos. 6ta edición. México Editorial Pearson.2006.
Organización Mundial de la Salud, Suministro de agua mediante camión cisterna.
Recobro adicional de petróleo por métodos convencionales, PDVSA, Inyección de
Agua, Pág. 11.

SISPA .Sistema de información estadística del sector palmero. agosto de 2018.

ANEXOS

ANEXO A.

RESOLUCIÓN 1207 DEL 2014, por el MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE.



MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

RESOLUCIÓN No. 1207

(25 JUL 2014)

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas."

LA MINISTRA DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

En ejercicio de sus facultades legales y en desarrollo de lo dispuesto en los numerales 2 y 11 del artículo 5 de la Ley 99 de 1993, la Ley 373 de 1997, el Decreto - Ley 3570 de 2011 y,

CONSIDERANDO

Que la Constitución Política establece la obligación en cabeza del Estado y de los particulares de proteger las riquezas naturales de la Nación y planificar el uso y aprovechamiento de los recursos naturales para garantizar su conservación, restauración y uso sostenible.

Que el uso eficiente del agua es fundamental para la conservación del recurso hídrico, y es básico para el desarrollo sostenible.

Que la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, expedida en el año 2010, establece como estrategia el uso eficiente y sostenible del agua, la cual se orienta a fortalecer la implementación de procesos y tecnologías de ahorro y uso eficiente del agua.

Que en el contexto de Gestión Integral del Recurso Hídrico el reúso del agua residual aparece como una estrategia para el ahorro y uso eficiente del agua.

Que el reúso de agua residual constituye una solución ambientalmente amigable, capaz de reducir los impactos negativos asociados con la extracción y descarga a cuerpos de agua naturales.

Que en mérito de lo expuesto,

RESUELVE

ARTÍCULO 1. OBJETO Y ÁMBITO DE APLICACIÓN. La presente resolución tiene por objeto establecer las disposiciones relacionadas con el uso del agua residual tratada y no aplica para su empleo como fertilizante o acondicionador de suelos.

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

ARTÍCULO 2. DEFINICIONES. Para todos los efectos de aplicación e interpretación de la presente resolución, se tendrán en cuenta las siguientes definiciones:

- **Aguas Residuales Tratadas:** Son aquellas aguas residuales, que han sido sometidas a operaciones o procesos unitarios de tratamiento que permiten cumplir con los criterios de calidad requeridos para su reúso.
- **Criterio de Calidad:** Es el conjunto de parámetros con sus respectivos valores límites máximos permisibles que se establecen para un uso definido.
- **Limpieza Mecánica de Vías:** Es la labor realizada mediante el uso de equipos mecánicos para retirar de las vías y áreas públicas, papeles, hojas, arenilla acumulada y cualquier otro objeto o material.
- **Punto de Entrega de la Aguas Residuales Tratadas:** Lugar donde el Usuario Generador entrega al Usuario Receptor las aguas residuales tratadas.
- **Reúso:** Es la utilización de las aguas residuales tratadas cumpliendo con los criterios de calidad requeridos para el uso al que se va a destinar.
- **Usuario Generador del Agua Residual Tratada:** Es la persona natural o jurídica que genera las aguas residuales.
- **Usuario Receptor del Agua Residual Tratada:** Es la persona natural o jurídica que recibe y usa el agua residual tratada, pudiendo ser el mismo Usuario Generador o diferente a éste.

ARTÍCULO 3. DEL REÚSO. Cuando el Usuario Receptor es el mismo Usuario Generador, se requerirá efectuar la modificación de la Concesión de Aguas, de la Licencia Ambiental o del Plan de Manejo Ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de Aguas.

Cuando el Usuario Receptor es diferente al Usuario Generador, el primero deberá obtener la Concesión de Aguas, o la modificación de la Licencia Ambiental o del Plan de Manejo Ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de Aguas.

Cuando el Usuario Receptor es diferente al Usuario Generador, este último deberá presentar para el trámite de modificación de la Concesión de Aguas, Permiso de Vertimiento, Licencia Ambiental o Plan de Manejo Ambiental, según sea el caso, copia del acto administrativo mediante el cual la Autoridad Ambiental competente otorgó la concesión para el uso de las aguas residuales tratadas al Usuario Receptor, sin perjuicio de los demás requisitos que establece la presente resolución.

El suministro de las cantidades (volumen o caudal) de agua requeridas para satisfacer la Concesión para el uso de las aguas residuales tratadas está sujeto a la disponibilidad definida por parte del Usuario Generador.

El Estado no será responsable de garantizar la cantidad (volumen o caudal) concesionado al Usuario Receptor.

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

PARÁGRAFO PRIMERO. En ningún caso el Usuario Generador puede cobrar por las cantidades (volúmenes) de Agua Residual Tratada entregadas al Usuario Receptor.

PARÁGRAFO SEGUNDO. En la Concesión de Aguas para el uso de aguas residuales tratadas se definirá el área o sitio en el cual se realizará la actividad.

PARÁGRAFO TERCERO. El Usuario Receptor es el responsable de garantizar el cumplimiento de los criterios de calidad para el reúso de acuerdo con los usos establecidos en la Concesión de Aguas.

ARTÍCULO 4. DE LOS VERTIMIENTOS. En caso que el uso del agua residual tratada de lugar a la modificación del Permiso de Vertimientos, deberá adelantarse el trámite correspondiente ante la Autoridad Ambiental competente.

Si la totalidad de las aguas residuales tratadas se entregan para reúso no se requerirá permiso de vertimiento por parte del Usuario Generador y no habrá lugar al pago de la correspondiente Tasa Retributiva por la utilización directa e indirecta del agua como receptor de los vertimientos puntuales. En caso contrario si la entrega es parcial, deberá ajustarse el cobro conforme a la modificación del Permiso de Vertimientos.

ARTÍCULO 5. DEL BALANCE DE MATERIA O DE MASA. Tanto el Usuario Generador como el Usuario Receptor deberán entregar a la Autoridad Ambiental competente los respectivos balances de materia o de masa en términos de las cantidades de agua en su sistema, en el marco del trámite de la Concesión de Aguas y/o del Permiso de Vertimientos.

La Autoridad Ambiental competente deberá realizar la evaluación del balance de materia o de masa en términos de las cantidades de agua en cada sistema para efectos de otorgar la Concesión de Aguas y/o el Permiso de Vertimientos.

El balance de materia o de masa, tanto para el Usuario Generador como para el Usuario Receptor, debe satisfacer la Ley de Conservación de la Materia o de la Masa.

El Usuario Generador en el Balance de Materia o de Masa en términos de las cantidades de agua en su sistema, deberá especificar el período de tiempo durante el cual puede garantizar la entrega de las cantidades (volumen o caudal) de las aguas residuales para el reúso.

Esta información es parte imprescindible para adelantar el trámite ante la Autoridad Ambiental competente de la Concesión de Aguas por parte del Usuario Receptor y hará parte de las condiciones para otorgar la Concesión.

ARTÍCULO 6. DE LOS USOS ESTABLECIDOS PARA AGUA RESIDUAL TRATADA. Las aguas residuales tratadas se podrán utilizar en los siguientes usos

1. **Uso Agrícola.** Para el riego de:
 - Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.
- Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
- Jardines en áreas no domiciliarias.

2. Uso Industrial. En actividades de:

- Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.
- Descarga de aparatos sanitarios.
- Limpieza mecánica de vías
- Riego de vías para el control de material particulado.
- Sistemas de redes contraincendio.

PARÁGRAFO PRIMERO. Cuando el agua residual tratada se utilice en la descarga de aparatos sanitarios, las aguas residuales resultantes deberán someterse a tratamiento como agua residual no doméstica.

PARÁGRAFO SEGUNDO. En lo que respecta a los cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales, y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos, puede usarse el agua residual tratada para riego siempre y cuando se cumplan las normas de la autoridad sanitaria y agrícola en el ámbito de sus competencias.

ARTÍCULO 7. CRITERIOS DE CALIDAD. El uso de agua residual tratada deberá cumplir previamente los siguientes criterios de calidad:

1. USO AGRÍCOLA

- Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.
- Cultivos no alimenticios para humanos o animales.
- Cultivos de fibras celulósicas y derivados.
- Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.
- Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.
- Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

Variable	Unidad de Medida	Valor Limite Máximo Permissible
FÍSICOS		
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0
Conductividad	µS/cm	1.500,0
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+5)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0*E(2)
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1,0
QUÍMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	1,5
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
Iones		
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,2
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	300,0
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0
Metales		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Níquel	mg Ni/L	0,2
Plomo	mg Pb/L	5,0
Sodio	mg Na/L	200,0
Vanadio	mg V/L	0,1
Metaloides		
Arsénico	mg As/L	0,1
Boro	mg B/L	0,4
No metales		
Selenio	mg Se/L	0,02
Otros parámetros		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl ₂ /L	Menor a 1,0
Nitratos (NO ₃ ⁻ -N)	mg/L	5,0

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

- Áreas verdes en parques y campos deportivos en actividades de ornato y mantenimiento.
- Jardines en áreas no domiciliarias.

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permisible
FISICOS		
pH	Unidades de pH	6,0 - 9,0
Conductividad	µS/cm	1.500,0
MICROBIOLÓGICOS		
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 mL	1,0*E(+4)
Enterococos Fecales	NMP/100 mL	1,0
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	1,0
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	1,0
<i>Salmonella sp</i>	NMP/100 mL	1,0
QUÍMICOS		
Fenoles Totales	mg/L	0,002
Hidrocarburos Totales	mg/L	1,0
Biocidas		
2,4 D ácido	mg/L	0,0001
Diurón	mg/L	0,0001
Glifosato	mg/L	0,0001
Mancozeb	mg/L	0,0001
Propineb	mg/L	0,0001
Iones		
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,2
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0
Metales		
Aluminio	mg Al/L	5,0
Berilio	mg Be/L	0,1
Cadmio	mg Cd/L	0,01
Cinc	mg Zn/L	3,0
Cobalto	mg Co/L	0,05
Cobre	mg Cu/L	1,0
Cromo	mg Cr/L	0,1
Hierro	mg Fe/L	5,0
Litio	mg Li/L	2,5
Manganeso	mg Mn/L	0,2
Mercurio	mg Hg/L	0,002
Molibdeno	mg Mo/L	0,07
Níquel	mg Ni/L	0,2
Vanadio	mg V/L	0,1
Metaloides		
Antimonio	mg Sb/L	0,05
Arsénico	mg As/L	0,1
No Metales		
Selenio	mg Se/L	0,02
Otros		
Cloro Total Residual (con mínimo 30 minutos de contacto)	mg Cl ₂ /L	Menor a 1,0
Nitratos	mg NO ₂ ⁻ -N/L	5,0

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

2. USO INDUSTRIAL

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permissible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.	Descarga de Aparatos Sanitarios	Limpieza mecánica de vías y Riego de vías para el control de material nauticulado.	Sistemas de redes contraincendio
FISICOQUÍMICOS					
pH	Unidades de pH	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0	6,0 – 9,0
MICROBIOLÓGICOS					
Coliformes Termotolerantes	NMP/100 ml	1,0*E(+3)	1,0*E(+4)	1,0*E(+3)	1,0*E(+1)
Helmintos Parásitos Humanos	Huevos y Larvas/L	0,1	1,0	1,0	0,1
Protozoos Parásitos Humanos	Quistes/L	0,0	1,0	1,0	1,0
<i>Salmonella sp.</i>	NMP/100 ml	1,0	1,0	1,0	1,0
QUÍMICOS					
Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX)	mg/L	0,001		0,001	
Esteres Ftalatos	mg/L	0,005		0,005	
Fenoles	mg/L	0,002		0,002	
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	mg/L	0,01		0,01	
Biocidas					
2,4 D ácido	mg/L	0,0001		0,0001	
Diurón	mg/L	0,0001		0,0001	
Glifosato	mg/L	0,0001		0,0001	
Mancozeb	mg/L	0,0001		0,0001	
Propineb	mg/L	0,0001		0,0001	
Iones					
Cianuro Libre	mg CN ⁻ /L	0,05			
Cloruros	mg Cl ⁻ /L	300,0		300,0	300,0
Fluoruros	mg F ⁻ /L	1,0			
Sulfatos	mg SO ₄ ²⁻ /L	500,0		500,0	500,0
Metales					
Aluminio	mg Al/L	5,0		5,0	
Berilio	mg Be/L	0,1		0,1	
Cadmio	mg Cd/L	0,01		0,01	
Cinc	mg Zn/L	3,0		3,0	
Cobalto	mg Co/L	0,05		0,05	
Cobre	mg Cu/L	1,0		1,0	
Cromo	mg Cr/L	0,1		0,1	
Plomo	mg Pb/L	5,0		5,0	

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

Variable	Unidad de Medida	Valor Límite Máximo Permissible			
		Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas	Descarga de Aparatos Sanitarios	Limpieza mecánica de vías y Riego de vías para el control de material particulado	Sistemas de redes contraincendio
Hierro	mg Fe/L	5,0		5,0	
Litio	mg Li/L	2,5		2,5	
Manganeso	mg Mn/L	0,2		0,2	
Mercurio	mg Hg/L	0,001		0,001	
Molibdeno	mg Mo/L	0,07		0,07	
Níquel	mg Ni/L	0,2		0,2	
Vanadio	mg V/L	0,1		0,1	
Metaloides					
Arsénico	mg As/L	0,1		0,1	
No Metales					
Selenio	mg Se/L	0,01		0,02	
Otros					
Demanda Bioquímica de Oxígeno 5 días (DBO ₅)	mg O ₂ /L			30,0	

PARÁGRAFO PRIMERO. Para el uso agrícola, el Usuario Receptor deberá demostrar mediante mediciones in situ, balance de humedad en el suelo u otros procedimientos técnicamente establecidos por la ciencia y la técnica, que las cantidades de agua y los tiempos de aplicación en los diferentes períodos estacionales, satisfacen los requerimientos de agua del suelo y/o del cultivo y que no se generan cantidades excedentes de la misma como escorrentía o percolación.

PARÁGRAFO SEGUNDO. Cuando se realice el riego en cultivos de pastos y forrajes de corte para consumo animal, sólo se puede realizar el pastoreo de los animales en las áreas que se sometieron a procesos de riego luego de quince (15) días después de finalizada la última irrigación.

PARÁGRAFO TERCERO. La exclusión de uno o más parámetros deberá solicitarse ante la Autoridad Ambiental competente y estar sustentada con el empleo de balances de materia y la caracterización de las aguas residuales tratadas la cual debe ser efectuada por el Usuario Receptor.

ARTÍCULO 8. DISTANCIAS MÍNIMAS DE RETIRO PARA EL DESARROLLO DEL REÚSO. Además de cumplir con los criterios de calidad para el reúso, se debe cumplir con las siguientes distancias mínimas de retiro al momento de efectuar la actividad de reúso:

USO	DISTANCIA MÍNIMA (metros)
Agrícola	

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

USO	DISTANCIA MÍNIMA (metros)
Agrícola	
<p>Cultivos de pastos y forrajes para consumo animal.</p> <p>Cultivos no alimenticios para humanos o animales.</p> <p>Cultivos de fibras celulósicas y derivados.</p> <p>Cultivos para la obtención de biocombustibles (biodiesel y alcohol carburante) incluidos lubricantes.</p> <p>Cultivos forestales de madera, fibras y otros no comestibles.</p> <p>Cultivos alimenticios que no son de consumo directo para humanos o animales, y que han sido sometidos a procesos físicos o químicos.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 90 metros medidos desde la línea de mareas máximas o la del cauce permanente de todo cuerpo de agua superficial hasta el perímetro de las áreas de aplicación. • 90 metros de radio medidos desde los pozos y aljibes de agua subterránea hasta el perímetro de las áreas de aplicación. • 30 metros de radio medidos desde cada punto de aplicación en aquellas áreas con acceso de personal, si el riego es realizado por aspersión durante el lapso de tiempo que dure esta actividad.
<p>Ornato y mantenimiento de áreas verdes en parques y campos deportivos.</p> <p>Jardines en áreas no domiciliarias</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 15 metros medidos desde la línea de mareas máximas o la del cauce permanente de todo cuerpo de agua superficial hasta el perímetro de las áreas de aplicación. • 15 metros de radio medidos desde los pozos y aljibes de agua subterránea hasta el perímetro de las áreas de aplicación. • 30 metros de radio medidos desde cada punto de aplicación en aquellas áreas con acceso al público, si el riego es realizado por aspersión, durante el lapso de tiempo que este se esté realizando.

USO	DISTANCIA MÍNIMA (metros)
Industrial	
<p>Intercambio de calor en torres de enfriamiento y en calderas.</p> <p>Descarga de aparatos sanitarios.</p> <p>Limpieza mecánica de vías.</p> <p>Riego de vías para el control de material particulado.</p> <p>Sistemas de redes contraincendio.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • 15 metros medidos desde la línea de mareas máximas o la del cauce permanente de todo cuerpo de agua superficial hasta el perímetro de las áreas de reúso. • 15 metros de radio medidos desde los pozos y aljibes de agua subterránea hasta el perímetro de las áreas de reúso. • 90 metros de radio medidos desde cada punto de reúso en torres de enfriamiento durante el lapso de tiempo que dure esta actividad para aquellas áreas con acceso al público. • 30 metros de radio medidos desde cada punto de aplicación cuando se presente la operación de los sistemas de redes contraincendio.

ARTÍCULO 9. DE LAS OBRAS. La construcción, operación, mantenimiento y protección de las obras que se requieran para el desarrollo de las actividades de reúso desde el punto de entrega de las aguas residuales tratadas cumpliendo con el criterio de calidad, son responsabilidad del Usuario Receptor y deberán contar con los permisos y autorizaciones a que haya lugar.

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

ARTÍCULO 10. DE LA PREVENCIÓN. Para la obtención de la Concesión de Aguas para el uso de aguas residuales tratadas, el Usuario Receptor de acuerdo con el literal g del artículo 62 del Decreto 1541 de 1978, deberá presentar para evaluación de la autoridad ambiental competente un documento en el que se definan las medidas y actividades a ser desarrolladas para prevenir el deterioro del recurso hídrico y de los demás recursos relacionados.

En este documento se debe incluir el Estudio de Análisis de la Vulnerabilidad Intrínseca Detallada de los Acuíferos a la Contaminación para el Uso Agrícola, cuando las actividades productivas en las que se realice el reúso se efectúen en áreas superiores a quinientas (500,0) hectáreas.

El Usuario Receptor que realizará actividades de reúso en uso agrícola, debe entregar a la Autoridad Ambiental competente como parte de la documentación a ser aportada para la obtención de la Concesión de Aguas y de acuerdo con las condiciones particulares del suelo y de los criterios agronómicos aplicables, el grado de restricción aplicable en términos de:

- Salinidad.
- Sodicidad.
- Toxicidad, según la Resolución IDEAM 0062 de 2007 o aquella que la modifique o sustituya.

Igualmente, deberá realizar el análisis y reporte de los resultados de los siguientes parámetros:

- Relación de Absorción de Sodio (RAS).
- Porcentaje de Sodio Posible (PSP).
- Salinidad efectiva y potencial.
- Carbonato de sodio residual
- Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO₅

ARTÍCULO 11. DEL MONITOREO Y SEGUIMIENTO. El Usuario Receptor deberá presentar para su aprobación ante la Autoridad Ambiental Competente y de forma simultánea con la solicitud para la obtención o modificación de la Concesión de Aguas para el uso de aguas residuales tratadas, la Licencia Ambiental o el Plan de Manejo Ambiental cuando estos instrumentos incluyan la Concesión de Aguas, un plan de monitoreo del agua residual tratada, a ser desarrollado durante la vigencia de la autorización ambiental.

Adicionalmente, para el uso agrícola se deberá incluir en este plan de monitoreo, el suelo, los cuerpos de aguas superficiales y subterráneas, que se encuentren dentro del área en la cual se realiza el reúso y los cuerpos de agua superficiales perimetrales a la misma.

El Usuario Generador deberá instalar en el punto de entrega los elementos de control que permitan conocer en cualquier momento la cantidad (caudal o volumen) de agua residual tratada que se está entregando para el reúso.

ARTÍCULO 12. DE LAS SITUACIONES CONTINGENTES. En caso de presentarse una contingencia ambiental por el uso de aguas residuales tratadas, se deberá

"Por la cual se adoptan disposiciones relacionadas con el uso de aguas residuales tratadas"

informar a la Autoridad Ambiental competente y se deberán suspender el uso de las aguas residuales tratadas por parte del Usuario Receptor hasta que se ejecuten todas las acciones necesarias para hacer cesar la contingencia ambiental.

La elaboración del análisis y la implementación de las medidas de prevención, control, mitigación y compensación de dichos impactos, deberán ser formuladas e implementadas por el Usuario Generador y por el Usuario Receptor, de acuerdo con lo que sea establecido por la Autoridad Ambiental competente.

ARTÍCULO 13. RÉGIMEN DE TRANSICIÓN. Los Usuarios que a la entrada en vigencia de la presente Resolución tengan concesiones, autorizaciones o permisos vigentes para el reúso de aguas residuales y estén cumpliendo con los términos, condiciones y obligaciones establecidos en las mismas, deberán dar cumplimiento a la presente Resolución dentro de los doce (12) meses siguientes contados a partir de la fecha de publicación de la misma.

ARTÍCULO 14. VIGENCIA. La presente Resolución rige a partir de su publicación en el Diario Oficial.

PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE

Dado en Bogotá, D.C. a los

25 JUL 2014



LUZ HELENA SARMIENTO VILLAMIZAR
Ministra de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Proyectó:
Revisó:
Aprobó:

DM MORENO - NJIMENÉZ - CAALVAREZ
FC CARVAJAL - HCASTELLANOS
PVEIRA - CAÑESTRA - CPPINEDA

ANEXO B

CARTERA TOPOGRÁFICA ESTACION DE BOMBEO ACACIAS – CULTIVOS DE PALMA Y CAÑA DE LA EMPRESA PALMERAS DEL LLANO S.A.

Consta de 21 tramos equidistantes con 446 m de diferencia, con su respectiva Longitud, latitud y elevación, elaborado con datos obtenidos de la herramienta Google Earth.

Trayecto	ESTACIÓN ACACIAS		CULTIVOS DE PALMA Y CAÑA		ELEVACIÓN (m)	DISTANCIA (m)
	PUNTO	LONGITUD	LATITUD			
1	N52	49,87	O37	52,58	399	0
2	N52	04,29	O37	51,93	404	446
3	N52	18,72	O37	51,29	421	892
4	N52	32,85	O37	50,66	419	1338
5	N52	47,57	O37	50,00	419	1784
6	N52	01,99	O37	49,35	419	2230
7	N52	16,13	O37	48,72	416	2676
8	N52	30,56	O37	48,08	419	3122
9	N52	44,98	O37	47,43	408	3568
10	N52	59,41	O37	46,79	410	4014
11	N52	13,83	O37	46,14	413	4460
12	N52	27,97	O37	45,51	418	4906
13	N52	42,40	O37	44,87	414	5352
14	N52	56,82	O37	44,22	421	5798
15	N52	11,25	O37	43,58	422	6244
16	N52	25,96	O37	42,92	419	6690
17	N52	40,10	O37	42,29	416	7136
18	N52	54,52	O37	41,64	405	7582
19	N52	08,95	O37	41,00	398	8028
20	N52	23,37	O37	40,35	391	8474
21	N52	38,09	O37	39,70	401	8920

ANEXO C

PE 100 / PN 10 Presión Nominal (PN) de Trabajo a 23°C : 10Bar - 145 Psi (RDE 17)

Diámetro Nominal mm.	Referencia	Diámetro Exterior Prom.	Espesor de Pared Mínimo	Diam. Interior mm	Presentación	Peso kg/m
63	2900296	63	3,8	55.40	Rollo 100 m	0.74
★ 75	2905663	75	4.4	66.18	Rollo 100 m	1.01
90	2900298	90	5,4	79.20	Rollo 100 m	1.49
110	2900287	110	6,6	96.80	Rollo 50 m	2.20
★ 160	2900291	160	9,5	141.00	Tramo 6/12 m	4.57
200	2902458	200	11,9	176.20	Tramo 6/12 m	7.13
250	2902459	250	14.8	220.40	Tramo 6/10 m	11.24
315	2902497	315	18.7	277.60	Tramo 6/10 m	17.97
355	2904620	355	21.1	312.80	Tramo 6/10 m	22.85
400	2904621	400	23.7	352.60	Tramo 6/10 m	28.27