

**Diseño de un Sistema de Tratamiento de Agua de Producción para Vertimiento Basado en
Humedales Artificiales Aplicado para el Campo Río Zulia**

Diana Carolina Valencia Hernández, Maycol Estiven Morales Arias

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniero de Petróleos

Director

John Alexander León Pabón

Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos

Codirector

Luis Alberto Escalante

Ingeniero de Petróleos

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físico-Químicas
Escuela de Ingeniería de Petróleos**

Bucaramanga

2020

Dedicatoria

Quiero dedicar este logro principalmente a Dios por ser mi compañero de guerras y batallas, pero sobretodo mi guía durante todo este proceso ayudándome en todo mi desarrollo personal y profesional.

A mis padres por su amor y apoyo incondicional, mil gracias por creer en mí, por sus innumerables consejos, por siempre ser un ejemplo y enseñarme que todo en la vida requiere de una cuota de sacrificio, les agradezco infinitamente porque sé que con su cariño y educación me han formado como una persona de bien, por eso estoy alcanzado mis metas con mucho orgullo y les debo un eterno agradecimiento y mi retribución total por su gran amor.

A mis hermanos a quienes adoro con toda mi alma, en especial a William a quien expreso mi agradecimiento por sacarme tiempo y demostrarme su apoyo e interés en mi aprendizaje y formación profesional.

A mi familia porque es de las cosas más valiosas que tenemos y aunque a veces estamos rodeados de alegrías, tristezas y desacuerdos la familia es familia y en la vida con lo único que contamos es con las personas que amamos.

A mi querida amiga Carolina De la cruz, por convertirse en esa persona incondicional con quien siempre cuento y he compartido alegrías y tristezas.

Agradezco a la vida por todo lo que he recibido y todo lo que aún está por llegar.

A la Universidad Industrial de Santander, especialmente a la escuela de Ingeniería de petróleos que me dieron la oportunidad de ser parte de ellos.

Diana Carolina Valencia Hernández

Dedicatoria

A Dios por tantas bendiciones recibidas.

A mi madre Blanca Azucena Morales Arias, una mujer luchadora, berraca que es mi mama y mi papa, la persona que me sacó adelante y me apoyo en mi carrera desde el inicio; gracias por tanto sacrificio, Dios te bendiga eres la mejor mujer del mundo. Por eso este título es dedicado a mi madre debido a que con su esfuerzo y su sudor he llegado hasta aquí.

A mi hermano Edwin Felipe Morales Arias, un hombre berraco y luchador, que desde niño se ha ganado mi respeto y amor; que junto con mi mama son las dos personas a las cuales más admiro y les dedico esto.

A mi director de tesis Jhon León por guiarme en este proyecto con sus conocimientos y su paciencia, excelente ser humano.

A mi compañera de proyecto por haber sido participe de la realización de este trabajo.

Por último, no sin menor importancia a la Universidad Industrial de Santander, por tantos conocimientos que me ha dejado y el amor que le tengo al alma mater.

Maycol Estiven Morales Arias

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a:

El Ing. John Alexander León Pabón, director del proyecto, por el apoyo brindado durante este proceso, por sus aportes y orientación; al Ing. Manuel Enrique Cabarcas Simancas, por su aporte y exigencia para nuestro proyecto.

A la escuela de Ingeniería de petróleos y su cuerpo docente por la orientación brindada durante nuestro proceso de formación porque contribuyen a la formación ética y profesional de sus estudiantes.

Principalmente gracias a Dios, gracias a nuestros familiares y amigos, finalmente gracias a nuestra querida Universidad Industrial de Santander.

Contenido

	Pág.
Introducción	17
1. Objetivos	19
1.1 Objetivo general	19
1.2 Objetivos específicos	19
2. Humedales artificiales	20
2.1 Componentes de los humedales artificiales	20
2.2 Tipos de humedales artificiales	21
2.3 Principales ventajas y desventajas de la implementación y uso de humedales artificiales	24
2.4 Vegetación utilizada en la construcción de humedales artificiales	26
2.5 Tipos de humedales subsuperficiales	28
2.6 Mecanismos de remoción y procesos que contribuyen la descontaminación del agua de producción en humedales de flujo subsuperficial	29
2.7 Desarrollo de humedales en la industria del petróleo y gas	30
3. Tratamiento de aguas residuales	32
3.1. Parámetros importantes en el tratamiento de aguas residuales	33
3.1.1. Demanda química de Oxígeno (DQO).	33
3.1.2 Demanda biológica de oxígeno (DBO).....	33
3.1.3 pH.....	33

3.1.4 Solidos Suspendidos Totales.....	34
3.1.5 Metales Pesados.....	34
3.2 Efectos ambientales causados por la actividad petrolera.....	34
3.3 Normatividad colombiana sobre aguas residuales en las actividades petroleras.....	35
3.3.1 Destino del agua de producción de un campo petrolero.....	35
3.3.2 Normas de calidad para el vertimiento de aguas en Colombia.....	37
4. Campo Rio Zulia.....	40
4.1 Generalidades del campo.....	40
4.1.1 Captación de agua subterránea del campo Rio Zulia.....	43
4.1.2 Actividad que genera el vertimiento de aguas residuales del campo Rio Zulia.....	43
4.2 Descripción de los procesos de tratamientos actuales del campo.....	43
4.2.1 Estación de tratamiento GS1.....	44
4.2.2 Estación de tratamiento GS2.....	47
4.2.3 Estación principal.....	51
4.3 Caudales del campo Rio Zulia.....	54
4.3.1 Caudales de la subestación GS1.....	54
4.3.2 Caudales de la subestación GS2.....	55
4.3.3. Caudales de la estación principal.....	57
4.4 Análisis del contenido fisicoquímico de aguas residuales del campo Rio Zulia.....	60
5. Consideraciones del diseño.....	61
5.1 Modelo general de diseño.....	63
5.2 Caudal de diseño.....	65
5.3 Selección del medio granular.....	66

5.4 Membranas.....	67
5.5 Paredes laterales.....	67
5.6 Tamaño y área del humedal artificial.....	69
5.7 Dimensiones del humedal.....	70
5.8 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento.....	73
5.9 Mantenimiento	74
5.9.1 Colmatación.....	74
5.10 Monitoreo y eficiencia del humedal construido.....	76
6. Evaluación económica del proyecto	76
6.1 CAPEX	76
6.2 OPEX	78
6.2.1 Costo del sistema de tratamiento actual del campo Rio Zulia.....	78
6.2.2 Costo de un sistema de tratamiento adicional en el campo Rio Zulia.....	81
7. Conclusiones.....	82
8. Recomendaciones	83
Referencias bibliográficas.....	85

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Clasificación de los humedales artificiales	22
<i>Figura 2.</i> Humedales de flujo superficial.	23
<i>Figura 3.</i> Humedales de flujo subsuperficial.....	24
<i>Figura 4.</i> Tipos de humedales subsuperficiales.....	29
<i>Figura 5.</i> Ubicación geográfica del campo Rio Zulia.	41
<i>Figura 6.</i> Estación de tratamiento GS1.....	45
<i>Figura 7.</i> Facilidades de la subestación GS1.....	47
<i>Figura 8.</i> Estación de tratamiento GS2.....	47
<i>Figura 9.</i> Facilidades instaladas en la estación GS2.....	50
<i>Figura 10.</i> Estación principal. ECOPETROL S.A.	51
<i>Figura 11.</i> Sistema de tratamiento de aguas residuales campo Rio Zulia. A	52
<i>Figura 12.</i> Sistema de tratamiento de agua	53
<i>Figura 13.</i> Sistema de tratamiento de aguas residuales campo Rio Zulia.	54
<i>Figura 14.</i> Esquema de implementación del HCFSSH	72
<i>Figura 15.</i> Esquema y diseño del humedal artificial propuesto	73
<i>Figura 16.</i> Diagrama de flujo del sistema de tratamiento	73
<i>Figura 17.</i> Etapas de colmatación en lechos de humedales de FSSH.	75

Figura 18. Comparación de tamaños entre humedales construidos y el propuesto en el campo

Rio Zulia 80

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Ventajas y desventajas de los humedales de flujo superficial y sub superficial</i>	25
Tabla 2. <i>Vegetación utilizada en la construcción de humedales</i>	27
Tabla 3. <i>Comparación entre humedales de flujo horizontal y vertical del tipo sub superficial</i> ...	28
Tabla 4. <i>Antecedentes importantes de la aplicación de humedales artificiales en la industria petrolera</i>	31
Tabla 5. <i>Normas de vertimiento en Colombia según el decreto 1594 de 1984</i>	38
Tabla 6. <i>Parámetros fisicoquímicos que se deben monitorear para las actividades de hidrocarburos según la resolución 0631 de 2015</i>	39
Tabla 7. <i>Ubicación del campo Rio Zulia</i>	41
Tabla 8. <i>Pozos del campo Rio Zulia</i>	42
Tabla 9. <i>Características climatológicas del campo Rio Zulia</i>	42
Tabla 10. <i>Producción por pozo de la estación GS1</i>	45
Tabla 11. <i>Facilidades de la subestación GS1</i>	46
Tabla 12. <i>Producción por pozo de la estación GS2</i>	48
Tabla 13. <i>Facilidades instaladas en la estación GS2</i>	49
Tabla 14. <i>Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1</i>	55
Tabla 15. <i>Manejo de la producción en la estación GS1</i>	55

Tabla 16. <i>Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS2.</i>	56
Tabla 17. <i>Manejo de la producción en la estación GS2.</i>	56
Tabla 18. <i>Datos de diseño y capacidad instalada en la estación principal.</i>	57
Tabla 19. <i>Manejo de la producción en la estación principal.</i>	58
Tabla 20. <i>Almacenamiento de la estación principal.</i>	58
Tabla 21. <i>Resumen de los equipos para tratamiento de aguas residuales industriales (ARI) del campo Rio Zulia.</i>	59
Tabla 22. <i>Caracterización y parámetros fisicoquímicos del vertimiento.</i>	60
Tabla 23. <i>Eficiencia de remoción de los humedales artificiales de flujo superficial y sub superficial en ubicaciones no especificadas</i>	62
Tabla 24. <i>Valores de los parámetros requeridos según Kadlec and Knight (1996)</i>	65
Tabla 25. <i>Pronósticos de producción proyectada para el Campo Río Zulia.</i>	66
Tabla 26. <i>Características normales de un medio poroso de humedales de flujo sub superficial.</i>	66
Tabla 27. <i>Parámetros y valores de diseño</i>	68
Tabla 28. <i>Configuración de diseño del humedal artificial</i>	71
Tabla 29. <i>Costos iniciales estimados para construcción de un humedal artificial en el campo Rio Zulia</i>	77
Tabla 30. <i>Costo del sistema de tratamiento actual del campo Rio Zulia</i>	77
Tabla 31. <i>Comparación de costos de un humedal de flujo sub superficial y un sistema convencional de tratamiento de agua residual</i>	79
Tabla 32. <i>Áreas requeridas en otros proyectos de humedales artificial</i>	80
Tabla 33. <i>Requerimientos adicionales para el tratamiento de agua residuales del campo Rio Zulia.</i>	

Resumen

Título: Diseño de un Sistema de Tratamiento de Agua de Producción para Vertimiento Basado en Humedales Artificiales Aplicado para el Campo Río Zulia*

Autores: Diana Carolina Valencia Hernández, Maycol Estiven Morales Arias**

Palabras clave: humedal artificial, tratamiento de aguas, petróleo, campo Río Zulia, humedal de flujo subsuperficial, diseño de un humedal

Descripción

El presente trabajo de grado es un estudio y un diseño de un humedal artificial de flujo subsuperficial, que tiene como propósito en primer lugar, identificar los parámetros necesarios para el diseño de un humedal en el campo Río Zulia teniendo en cuenta el análisis físico químico del agua de producción del mencionado campo; a la entrada y a la salida del sistema de tratamiento actual.

En segundo lugar, realizar un análisis de las necesidades del sistema de tratamiento de aguas residuales de la estación GS1, GS2 y la estación principal, ofreciendo un proyecto de humedal artificial como un complemento ecológico y sostenible que reduce las trazas de hidrocarburos en las piscinas de oxidación, logrando de esta manera que las aguas de vertimiento cumplan los criterios de calidad y usos según la norma 0631 de 2015.

Este estudio presenta una visión general del manejo del agua de producción proveniente del campo Río Zulia, la disposición actual que tienen estas aguas y la que tendrían en un periodo de 10 años, tiempo en el cual se detalló un análisis económico de la implementación y uso de un humedal artificial como método de tratamiento secundario en mencionado, obteniendo resultados favorables en cuanto al costo de barril tratado con este proyecto.

Finalmente se diseñó y esquematizó un humedal artificial de flujo subsuperficial. Para ello, se tuvo en cuenta la ecuación propuesta por Kadlec y Knight y los parámetros fisicoquímicos que requería esta ecuación, obteniendo un área de 1.800 m² con 60 celdas y una vegetación que es nativa de la región, considerándose de esta manera una alternativa viable como sistema de tratamiento de aguas residuales.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director: John Alexander León Pabón, Magíster en Ingeniería de Hidrocarburos. Codirector: Luis Alberto Escalante, Ingeniero de Petróleos

Abstract

Title: Design of a Production Water Treatment System for Shedding Based on Applied Artificial Wetlands for the Río Zulia Field*

Authors: Maycol Estiven Morales Arias, Diana Carolina Valencia Hernández**

Keywords: Production, Wetlands, Río Zulia Field

Description

The present grade work is a study and design of an artificial sub-surface flow wetland, whose purpose is firstly to identify the necessary parameters for the design of a wetland in the Río Zulia field taking into account the chemical physical analysis of the production water of the aforementioned field; at the entrance and exit of the current treatment system.

Second, carry out an analysis of the needs of the wastewater treatment system of the GS1, GS2 and main station, offering an artificial wetland project as an ecological and sustainable complement that reduces traces of hydrocarbons in the pools of oxidation, thus achieving that the discharge waters meet the criteria of quality and uses according to the norm 0631 of 2015.

This study presents an overview of the management of production water from the Río Zulia field, the current disposition that these waters have and the one they would have in a period of 10 years, at which time an economic analysis of the implementation and use was detailed. of an artificial wetland as a secondary treatment method mentioned, obtaining favorable results regarding the cost of barrel treated with this project.

Finally, an artificial sub surface flow wetland was designed and schematized. For this, the equation proposed by Kadlec and Knight and the physicochemical parameters required by this equation were taken into account, obtaining an area of 1,800 m² with 60 cells and a vegetation that is native to the region, thus considering a viable alternative as wastewater treatment system

* Degree work

** Faculty of Chemical-Chemical Engineering. Petroleum Engineering School. Director: John Alexander León Pabón, Master in Hydrocarbon Engineering. Co-director: Luis Alberto Escalante, Petroleum Engineer

Introducción

La producción de agua en un campo petrolero se hace inevitable debido a las condiciones de formación del hidrocarburo, la cantidad de agua producida puede variar desde unos barriles hasta miles por día. En ese sentido, la producción mundial de agua es de aproximadamente 8 barriles por cada barril de petróleo adquirido.

En relación con ello, el campo Rio Zulia, ubicado en el Norte de Santander tiene una producción actual de 25.000 barriles de agua por día. Cabe mencionar, que una parte es reinyectada al yacimiento como método de levantamiento artificial y la otra es tratada bajo las condiciones de la Normatividad Ambiental Colombiana para su disposición como vertimiento en el caño Mono y en el caño Zancudo.

En concordancia, el problema actual del sistema de tratamiento de aguas residuales en el campo Rio Zulia tiene que ver con la formación de una capa de grasas y aceites que se da en las piscinas de oxidación.

Por tanto, este recubrimiento debe ser removido de manera manual y frecuente para evitar que llegue al caño Mono y al caño Zancudo, haciendo que la calidad del efluente de agua se vea afectada, además situando al campo Rio Zulia en auditoria constante del Ministerio De Medio Ambiente.

Por consiguiente, el presente trabajo centra su atención en el diseño de un humedal artificial subsuperficial con flujo horizontal, el cual tiene la capacidad de retener y descomponer las grasas y aceites provenientes de las estaciones de tratamiento del campo Rio Zulia mediante la actividad

bioquímica que ocurre en las raíces de la vegetación instalada, considerándose como una alternativa ambiental, sostenible y económica.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Diseñar un sistema de tratamiento de aguas de producción basado en humedales artificiales para el campo Río Zulia.

1.2 Objetivos específicos

- Recolectar datos del campo como parámetros climáticos, geológicos, logísticos y profundizar en el caudal y los contaminantes presentes en el agua de producción para así definir el área de terreno a utilizar y tipo de humedal que más se adapte a las condiciones.
- Evaluar las concentraciones de materia orgánica y sólidos suspendidos en el agua de producción, a la entrada y la salida del sistema de tratamiento de aguas de producción utilizado actualmente en el campo Río Zulia.
- Esquematizar el diseño de tratamiento de aguas de producción a partir de humedales artificiales para el campo Río Zulia, teniendo en cuenta los datos obtenidos en estudios previos.
- Realizar una evaluación económica del sistema de tratamiento de aguas de producción que tiene el campo actualmente y comparar costos con el sistema de tratamiento de aguas de producción basado en humedales artificiales.

2. Humedales artificiales

Un humedal artificial o construido, es una zona saturada de aguas superficiales o subterráneas que sostiene condiciones del suelo aptas para mantener especies vegetales. Estas zonas son construidas con el fin de eliminar elementos o materiales contaminantes de aguas residuales mediante procesos físicos y químicos que se producen en el humedal artificial, gracias a la actividad biológica de especies vegetales que son capaces de eliminar sustancias orgánicas e inorgánicas. (Covarrubias, y otros, 1998)

Además de la descontaminación de aguas residuales de procesos industriales, los humedales artificiales lograr restaurar nichos ecológicos y el aprovechamiento de estas aguas en sistemas de riego.

2.1 Componentes de los humedales artificiales

Un humedal construido se compone de tres partes principales, los cuales representan los aspectos de diseño más importantes en un humedal artificial. La hidrología, el sustrato y las macrófitas o vida vegetal que el humedal albergara.

De esta manera, los sustratos utilizados en la construcción dependerán del sitio donde se ubicará el humedal. Cabe señalar, que por lo general estos se sitúan en tierra, grava, arena y rocas de tamaño pequeño y además poseen ciertas características como lo son; que el sustrato genere suficiente impermeabilidad para que el agua que entre no se filtre al subsuelo, así mismo, debe estar químicamente neutro para permitir la actividad bioquímica de los microorganismos y el

intercambio iónico, finalmente debe tener suficiente porosidad para albergar dentro los contaminantes y permitir el flujo del efluente.

De igual forma, el componente hidrológico representa un factor importante, pues de este depende el éxito del humedal, por tal motivo se debe garantizar un equilibrio másico entre el agua de entrada y el agua de salida con el fin de evitar la formación de lodos y empozamiento del agua en la superficie del humedal teniendo en cuenta, que si esto llegase a suceder traería problemas tales como; los mosquitos y malos olores.

En cuanto a la vida vegetal del humedal, cabe mencionar que esta previene la erosión del sustrato y reduce la velocidad de flujo del efluente, dando lugar a un flujo continuo y lento, así mismo como aún proceso de asentamiento de materiales contaminantes y nutrientes, es decir, las plantas que albergan los humedales crean materia orgánica en la superficie cuando sus hojas o partes de esta mueren, fomentando el crecimiento de microorganismos que ayudan a descomponer y descontaminar las aguas de componentes orgánicos. (Torczon, sf)

2.2 Tipos de humedales artificiales

Los humedales artificiales se clasifican principalmente según tres criterios importantes, la hidrología, el flujo y la forma de crecimiento de las plantas. Además, se pueden combinar sistemas con el fin de adaptarlos a las necesidades de cada proyecto y utilizar las diferentes ventajas que ofrece cada uno. En la figura 1 representa los tipos de humedales y su clasificación según Vymazal, 2011.

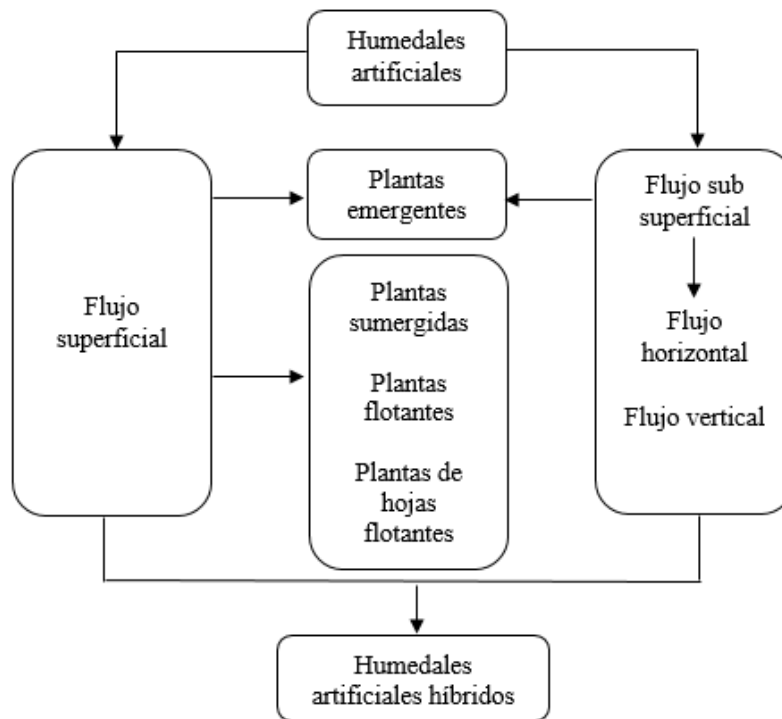


Figura 1. Clasificación de los humedales artificiales

Los humedales de flujo superficial están conformadas por canales pocos profundos, con baja velocidad de flujo y capacidad para albergar plantas flotantes, sumergidas y emergentes (Intergovernmental Panel on Climate Change, sf). Estos humedales tienen un recubrimiento de fondo para prevenir la percolación del agua susceptible a contaminarse. Las superficies sumergidas de estas plantas facilitan el crecimiento de microorganismos responsables del tratamiento biológico en el humedal.

Los humedales de flujo superficial se caracterizan por un flujo laminar de baja velocidad que facilita la remoción de sólidos suspendidos, metales y contaminantes orgánicos bajo las condiciones aeróbicas y anóxicas que caracterizan estos humedales.

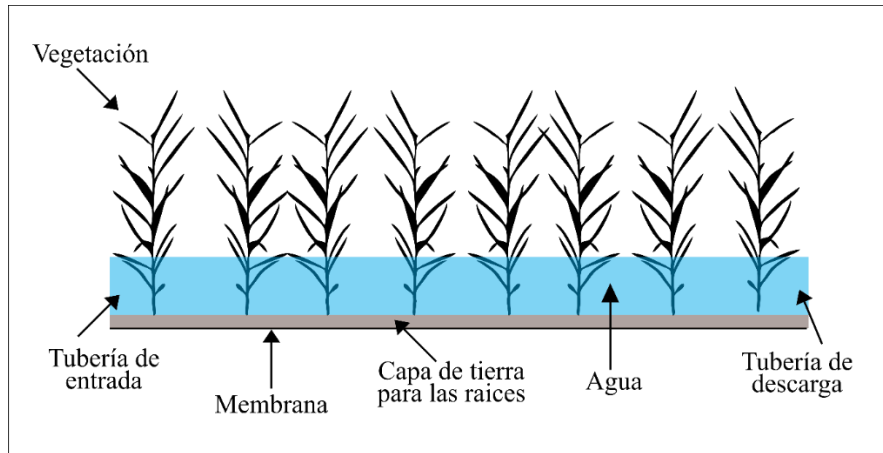


Figura 2. Humedales de flujo superficial. Adaptado de EPA 832-F-00-024. (septiembre de 2000).

Humedales de flujo libre superficial. Washington, D.C. Agency Environmental Protection United States

Un humedal artificial de flujo horizontal subsuperficial es un sistema ambientalmente sostenible y de bajo costo, en el que por medio de procesos físicos, químicos y biológicos se constituye como un sistema de tratamiento de aguas contaminadas. Los constituyen macrófitas, que son plantas sumergidas o flotantes que tienen la capacidad de descomponer contaminantes y albergar microorganismos que ayudan este propósito. Los humedales artificiales de flujo subsuperficial están contruidos con un lecho de grava o gravilla aislado con impermeabilizantes, en donde el flujo de entrada fluye de manera horizontal a través del medio poroso bajo la superficie del humedal. El flujo del agua debe mantenerse entre 5 y 15 cm debajo del lecho con el fin de distribuir uniformemente el flujo y evitar taponamientos. (EPA 832-F-00-023, 2000)

La grava que se usa es por lo general de un diámetro de 3,2 cm aproximadamente o menor; sin llegar a un tamaño de arena, ya que estos tienden a generar mayor taponamiento. La grava se distribuye sobre un recubrimiento impermeable. Cualquier planta con raíces anchas y profundas son apropiadas en la construcción de este tipo de humedales, por lo general se usa el carrizo

(*Phragmites australis*), pues esta planta presenta raíces que penetra la totalidad de la profundidad del lecho.

Uno de los problemas más comunes en los humedales artificiales es el taponamiento, por lo tanto, se sugiere un tratamiento primario de las aguas de entrada y de esta manera se alcanza una mayor calidad el efluente. Aunque con el tiempo se tiende a producir taponamiento, su mantenimiento apenas sugiere un remplazo de la grava apenas en unos 15 años o más y se debe asegurar que no crezcan arboles cerca al humedal construido, pues sus raíces podrían dañar el recubrimiento permeable.

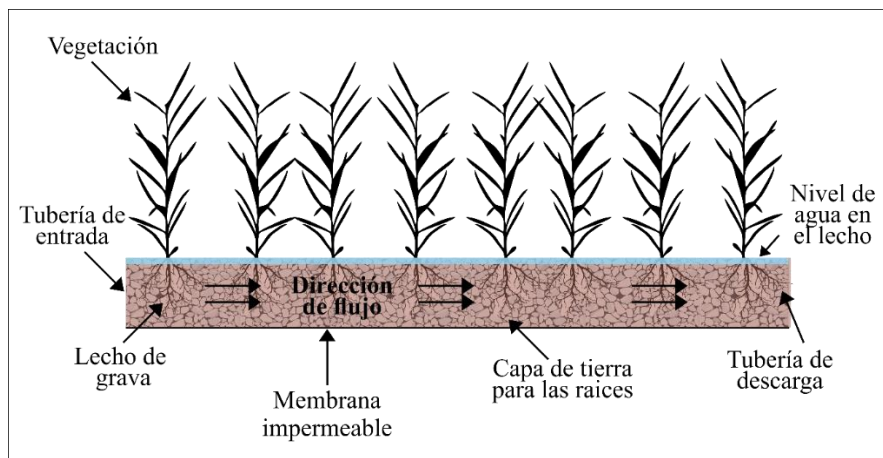


Figura 3. Humedales de flujo subsuperficial. Adaptado de EPA 832-F-00-023. (septiembre de 2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C. Agency Environmental Protection United States

2.3 Principales ventajas y desventajas de la implementación y uso de humedales artificiales

Los humedales artificiales son técnicamente factibles para tratar aguas residuales debido a varias razones entre las cuales se encuentran; los bajos costos de operación y mantenimiento, además de

los beneficios ambientales. Sin embargo, también tiene limitaciones, por tal motivo a continuación se presenta una tabla comparativa que muestra las ventajas y desventajas que poseen los humedales.

Tabla 1.

Ventajas y desventajas de los humedales de flujo superficial y subsuperficial

Humedal artificial	Ventajas	Desventajas
De flujo horizontal superficial	<ul style="list-style-type: none"> • Puede generar un hábitat para muchas especies • Diseño, construcción y mantenimiento simple • Bajo costo de construcción y operación 	<ul style="list-style-type: none"> • Falta de experiencias bien documentadas. • Menor eficiencia de remoción de contaminantes. • Promueve el crecimiento de mosquitos y malos olores. • Requiere de un sistema de tratamiento adicional
De flujo horizontal subsuperficial	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia de remoción de contaminantes • No promueve el crecimiento de mosquitos y malos olores • Menos costoso de construir • No producen lodos ni residuos solidos 	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor necesidad de área superficial, pero mucho menor que un humedal de flujo superficial. • Los metales pesados y otros contaminantes persistentes se pueden acumular con el tiempo • Difícil de monitorear

Tabla 1. (Continuación)

Humedal artificial	Ventajas	Desventajas
De flujo horizontal subsuperficial	<ul style="list-style-type: none"> Efectivo y confiable para la eliminación de DBO, DQO, SST, metales pesados, y compuestos orgánicos 	<ul style="list-style-type: none"> Puede presentar problemas de obstrucción Para mantener su eficiencia, es necesario someter el sistema a un efluente de flujo constante. La acumulación de sólidos en el lecho puede generar colmatación

Nota. EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. *United States Environmental Protection Agency, (Us Epa)*, 13.

De acuerdo con la tabla, se puede concluir que los humedales de flujo superficial comparado con los de flujo subsuperficial, presentan mayores desventajas y menos oportunidades de operación como tratamiento de aguas secundario pues su eficiencia es mucho menor que un humedal de flujo subsuperficial al requerir un sistema de tratamiento de aguas adicional.

2.4 Vegetación utilizada en la construcción de humedales artificiales

La presencia física de plantas en los humedales es importante, ya que a través de sus raíces ocurre transferencia de oxígeno de manera profunda. De igual manera, los restos de estas plantas como tallos, hojas y flores que mueren y caen sobre el humedal, sirven como sustrato que permite el crecimiento de agentes microbianos quienes son los responsables de gran parte del tratamiento que ocurre en el humedal. (Lara Borrero, Mayo de 1999)

Así mismo, las macrófitas permiten la transferencia entre gases, nutrientes y sedimentos a través de sus raíces mediante procesos bioquímicos. La mayoría de las plantas utilizadas comprenden

carrizos, espadañas y juncos de laguna debido a la alta capacidad de adaptación que estas tienen en sitios con altos valores de humedad en el sustrato y soportar niveles de pH ácidos y alcalinos.

Tabla 2.

Vegetación utilizada en la construcción de humedales

Vegetación	Características
Espadañas (Typha)	<ul style="list-style-type: none"> • Se adapta casi a cualquier ambiente. • Raíces más profundas • Rápida propagación en el medio • Penetración de raíces de hasta 30 Cm
Juncos (Juncus)	<ul style="list-style-type: none"> • Soportan temperaturas entre 18°C y 27 °C • Penetración de raíces de hasta 30 Cm
Carrizos (Phragmites)	<ul style="list-style-type: none"> • Rápido crecimiento • No es fuente de alimento para los animales • Mayor remoción de sólidos en suspensión • Penetración de raíces de hasta 70 cms
Papiros (Scirpus)	<ul style="list-style-type: none"> • Mayor eficiencia en transferencia de oxígeno debido a la verticalidad de sus raíces • Tolera altas salinidades y valores de pH muy ácidos o muy alcalinos en el sustrato • Penetración de raíces de hasta 76 Cm
Eleocharis mulata	<ul style="list-style-type: none"> • Penetración de las raíces entre 25 y 30 Cm • Alta eficiencia en remoción de contaminantes orgánicos e inorgánicos • Soporta bajas temperaturas
Eriochlaoa aristata	<ul style="list-style-type: none"> • Penetración de raíces en dirección vertical • Soporta ambientes muy alcalinos o muy ácidos en el sustrato
Cyperus articulatus	<ul style="list-style-type: none"> • Especie con alta presencia en zonas fronterizas con Venezuela como Cúcuta • Alta densidad de cobertura • Se adapta a temperaturas entre 20 y 30 °C

Nota. Lara Borrero, J. A. (mayo de 1999). Duración de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Barcelona. Instituto Catalán de Tecnología

Las plantas *Eleocharis multata* y *Eriochlaoa aristata*, son nativas en Colombia y se encuentran con mayor facilidad en el trópico colombiano, estas plantas fueron estudiadas por Caselles-Osorio, Villafañe, Caballero, Manzano, durante la investigación caracterizaron las condiciones ambientales de estas y la capacidad de remover contaminantes presentes en aguas residuales.

2.5 Tipos de humedales subsuperficiales

Los humedales de flujo subsuperficial se clasifican en los de flujo vertical y flujo horizontal, en el primero el agua circula a través del sustrato de manera intermitente de forma vertical, es decir, tienen fases de llenado, reacción y vertido, además requiere de un sistema de aireación para asegurar una condición aeróbica. En el segundo, el flujo se mantiene de forma continua, las condiciones bajo el sustrato son de carácter anaeróbico, pero pueden presentar problemas de colmatación.

A continuación, se presenta una comparación de uso entre estos tipos de humedales de flujo subsuperficial.

Tabla 3.

Comparación entre humedales de flujo horizontal y vertical del tipo subsuperficial

	Humedal subsuperficial de flujo horizontal	Humedal subsuperficial de flujo vertical
Funcionamiento	Continuo	Discontinuo
Operación	Fácil de operar	Mayor dificultad de operar
Eficiencia	Mucho mayor, pero requiere alta superficie	Menor, pero requiere mucho menos superficie
Mantenimiento	Fácil de realizar	Complejo de realizar

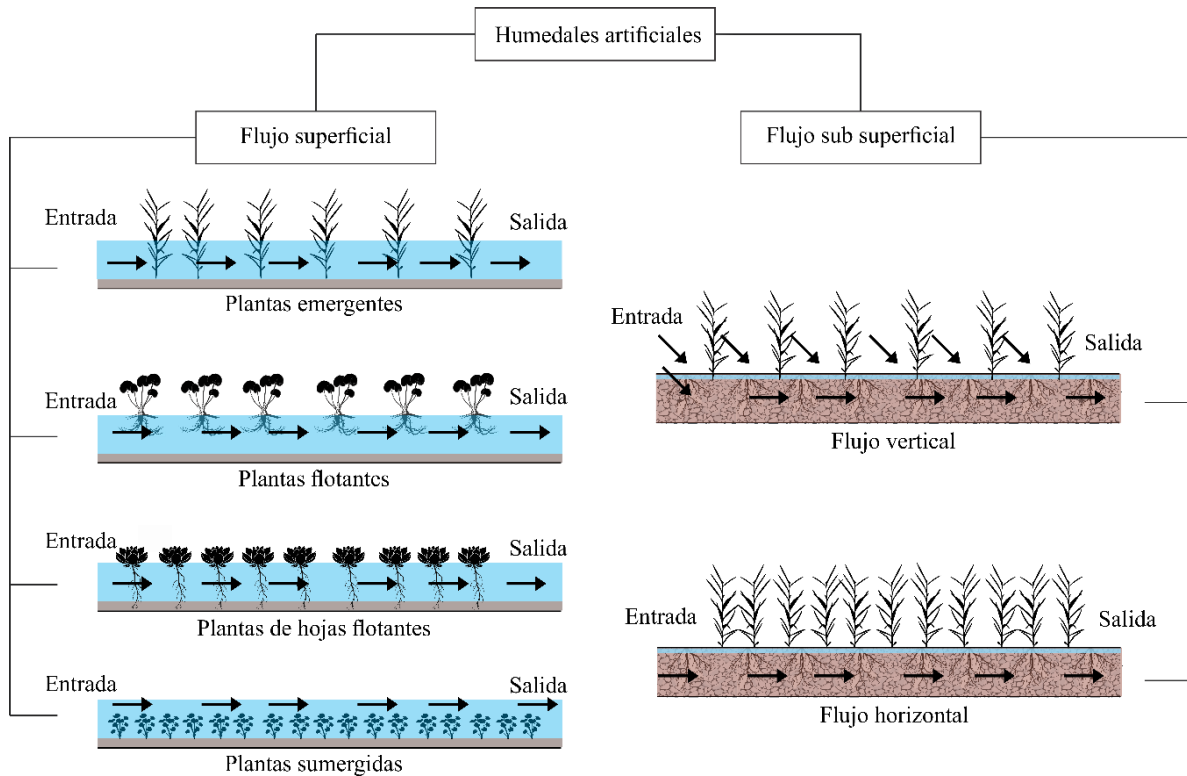


Figura 4. Tipos de humedales subsuperficiales. Modificado de Vymazal, Jan. (31 October 2006).

Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. Duke University Wetland Center, Nicholas School of the Environment and Earth Sciences, Durham, North Carolina 27708, USA

2.6 Mecanismos de remoción y procesos que contribuyen la descontaminación del agua de producción en humedales de flujo subsuperficial

Los humedales tienen la capacidad de eliminar altos niveles de DBO (demanda bioquímica de oxígeno) sólidos suspendidos, metales pesados, trazas de compuestos orgánicos y los mecanismos básicos de remoción de estos contaminantes se basan en la sedimentación, filtración, degradación química, degradación microbológica aeróbica y anaeróbica, microbológica, absorción, intercambio iónico y biodegradación. (Arias, Julio de 2003)

La materia orgánica particulada es retenida, pasa a transformarse en partículas mucho más pequeñas, las cuales serán asimiladas por las enzimas extracelulares secretadas por bacterias aeróbicas y fermentativas, el resultado es la formación de aminoácidos y glucosas que pueden ser asimiladas por las macrófitas y algunas bacterias. La degradación de la materia orgánica en humedales de flujo subsuperficial aparece en zonas cercanas a la superficie; en los primeros 20 cm de profundidad donde el agua y las raíces tienen mayor actividad

2.7 Desarrollo de humedales en la industria del petróleo y gas

Gracias a la actividad microbiana y el ambiente anóxico en zonas cercanas a las raíces de las macrófitas instaladas; es posible descomponer de forma eficiente compuestos orgánicos. En Dakota del Norte, desde la década de los 70 se han utilizado humedales artificiales para la eliminación de compuestos orgánicos y metales pesados industriales. La empresa Mobil Oil AG ubicada en Alemania maneja un sistema a gran escala de tratamiento de aguas, demostrando por más de 40 años la alta eficiencia de este proceso y la resistencia climática que ofrece como ventaja los humedales construidos.

Los casos de éxito de aplicación de esta tecnología, en Arizona y Reino Unido demuestran que la vegetación juega un papel importante, sobre todo en la forma y ubicación de sus raíces, según Omari et al. 2003 demostró que los humedales de flujo horizontal sub superficial, presentan mayor eficiencia en procesos de descontaminación en los diferentes procesos de recuperación de aguas en la industria del petróleo y del gas, la cual incluye la recuperación de las aguas subterráneas (Moore et al 2000; Wallace y Kadlec, 2005). Kadlec, 2001 concluyó que la transferencia de oxígeno a través de las raíces de las macrófitas fomenta la degradación de los hidrocarburos. Al

norroeste de Calgary, en Alberta se utilizan humedales artificiales para la recuperación de aguas producidas por la actividad petrolera, allí se utilizó un sistema de aireación con el cual en épocas de frío intenso, mejoró la eliminación de BTEX. La siguiente tabla resume los antecedentes importantes que han tenido los humedales artificiales en la industria del petróleo y el gas.

Tabla 4.

Antecedentes importantes de la aplicación de humedales artificiales en la industria petrolera.

Nombre localización	Descripción	Propósito	Fuente de las aguas residuales	Tamaño del humedal y flujo del efluente.
Refinería de Mandan	Es la mayor refinería de Dakota del Norte	Proceso de descontaminación	Agua del proceso de refinería	16,6 Ha 5700 m ³ /d
Refinería de Chevron en Richmond	Ubicada en California USA, procesa 240.000 Bbl/d	Proceso de descontaminación	Agua del proceso de refinería	36,4 Ha 9500 m ³ /d
Suncor Inc. Alberta, Canadá	Suncor se especializa en la producción de arenas bituminosas en Alberta, Canadá.	Instalación piloto	Aguas residuales del proceso de extracción de crudo de arenas bituminosas	0,08 Ha 17,3 m ³ /d
British Petroleum, Puerto everglade, Florida, USA	A pesar de su fracaso en el golfo de México, esta compañía sigue siendo una de las mayores productoras de petróleo en el mundo.	Instalación piloto	Aguas subterráneas de producción	0,007 Ha 27 m ³ /d

Nota. Knight, Robert L.; Kadlec, Robert; Ohlendorf, Harry M. (April 1999). The Use of Treatment Wetlands for Petroleum Industry Effluents. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230887885_The_Use_of_Treatment_Wetlands_for_Petroleum_Industry_Effluents

3. Tratamiento de aguas residuales

El impacto que tiene la actividad petrolera sobre el medio ambiente es de alto riesgo, debido a las graves consecuencias que tendría el derrame de hidrocarburos sobre la flora, la fauna y sobre la salud humana; en lugares donde los vertimientos de agua de producción superan las trazas de hidrocarburos máximas sugeridas por la normatividad ambiental colombiana.

Actualmente cerca del 97,72% del total de aguas residuales en la industria petrolera corresponde al agua producida durante la explotación petrolera. La relación agua/petróleo (RAP) según Ecopetrol para el año 2015 fue de 12,45 barriles de agua por barril de crudo producida.

El riesgo del vertimiento de estas aguas sin un control o tratamiento primario es de carácter medioambiental debido a las altas concentraciones de metales pesados como estroncio, cadmio, plomo y mercurio, además de los aceites y sólidos totales entre otros contaminantes. Dentro de las sustancias con mayor peligro aparte del mercurio y el plomo, están los hidrocarburos aromáticos dispersos en el agua como el benceno, tolueno y xileno (BETEX) pues son componentes que presentan un alto riesgo medio ambiental. (Mesa, Orjuela, Ortega, & Sandoval, 2018)

Una de las mayores preocupaciones de los vertimientos de aguas de producción es la contaminación que se puede generar en los recursos hídricos y la afectación que tienen en cuanto a la salud pública y medio ambiental.

En el corregimiento de Agua Clara, Vereda San Agustín de los Pozos se encuentran dos vertientes principales, Caño Zancudo y Caño mono, en los cuales se hace un vertimiento de aguas residuales industriales provenientes del proceso de desmulsificación del petróleo y la separación

del agua libre proveniente de los pozos activos del campo Rio Zulia, que actualmente son por lo menos 16.000 barriles de agua por día.

3.1. Parámetros importantes en el tratamiento de aguas residuales

3.1.1. Demanda química de Oxígeno (DQO). Este parámetro indica la cantidad de oxígeno con el cual los microorganismos tales como bacterias y hongos consumen durante la degradación de materia orgánica. Se utiliza para medir el grado de contaminación y se expresa en mg/L O₂. (Andreo, sf)

3.1.2 Demanda biológica de oxígeno (DBO). Es un parámetro que mide la cantidad de materia susceptible de ser consumida u oxidada por medios biológicos bajo condiciones aerobias que contiene una muestra líquida, y se utiliza para determinar su grado de contaminación y se expresa en mg/L O₂. Las mediciones de este parámetro se basan en un tiempo no menor a 5 días; tiempo suficiente en el cual las bacterias digieran materia orgánica (Oocities, sf). Las fuentes naturales de agua tienen por lo general valores de DBO muy bajos, sin embargo, se debe realizar esta prueba cuando el suministro de agua tiene una mala calidad. (Cyclucid, sf)

3.1.3 pH. Este valor está directamente relacionado con la calidad del agua, determina procesos únicos que están ligados a procesos químicos que solo pueden ocurrir cuando hay un valor determinado de pH, es decir, cuando existe un valor menor de 7 favorece el crecimiento de hongos y cuando estos son valores más alto beneficia la actividad biológica de las bacterias en el ecosistema.

3.1.4 Sólidos Suspendidos Totales. Es el contenido total de materia sólida en forma de coloides y responsables de dar la turbidez al agua, estos sólidos pueden ser separados fácilmente por procesos de filtración o sedimentación, sin embargo, la suspensión de estos sólidos depende de dos factores: el tamaño y la densidad de la partícula.

3.1.5 Metales Pesados. Algunos metales como el mercurio, plomo, selenio, arsénico entre otros, pueden persistir en el ambiente. Estos elementos pesados presentan niveles de toxicidad los cuales pueden causar daños en el organismo de los seres vivos y aumentar la posibilidad de desarrollar tumores entre otros perjuicios en los órganos vitales.

3.2 Efectos ambientales causados por la actividad petrolera

Durante cualquier actividad que relacione la búsqueda, exploración y explotación petrolera, se ven pueden generar una serie de alteraciones ambientales que pueden o no dependiendo de su magnitud afectar el ecosistema de cualquier forma.

Entre las alteraciones ambientales se puede generar el desplazamiento y migración de animales de sus ecosistemas de origen, la contaminación de estos entornos debidos a la introducción de sustancia que puedan alterar el equilibrio o el buen funcionamiento del medio inicial.

De igual manera, en medio de las actividades petroleras se pueden caracterizar efectos como la remoción de la cobertura vegetal, cambios en la conducta de los drenajes naturales, contaminación de aguas superficiales y acuíferos al no tener la capacidad suficiente para el tratamiento de aguas asociadas.

3.3 Normatividad colombiana sobre aguas residuales en las actividades petroleras

La principal preocupación sobre esta actividad petrolera es la disposición de aguas residuales contaminadas que pueden afectar las fuentes hídricas, el equilibrio biológico de la fuente y la salud de las personas que se ven beneficiadas por él. Por tal motivo, la legislación colombiana es clara con las normas y planes ambientales que se deben cumplir para dar una correcta disposición de las aguas residuales de las actividades petroleras.

3.3.1 Destino del agua de producción de un campo petrolero. Durante la producción de hidrocarburos, se produce una cantidad de agua que muchos casos supera la producción del hidrocarburo. Durante los años de vida de un campo son millones de barriles de agua que salen a la superficie y su disposición varía dependiendo del propósito y las necesidades del campo entre las que se encuentran el vertimiento en cuerpos de agua, la reinyección como método de recobro, uso con fines industriales o domésticas.

3.3.1.1 Vertimiento a cuerpos de agua: La primera opción para disponer del agua de producción, es la descarga a cuerpos de agua superficiales y subterráneos. Una de las preocupaciones es que estas aguas vienen con sales, metales pesados y sulfuros, por lo que se plantea un tratamiento previo al vertimiento para alcanzar los estándares de calidad establecidos en la normativa ambiental.

3.3.1.2 Inyección como método de recobro: La idea principal es convertir el agua de producción en una técnica reutilizable. Lo importante al momento de reinyectar el agua es asegurarnos de que el agua sea compatible con la formación subterránea, ya que de no ser compatible nos ocasionaría problemas irreparables como el taponamiento de la formación.

3.3.1.3 Inyección de agua con fin hidrológico: Esta se da cuando el agua que se utiliza para lograr la estabilización mecánica del yacimiento o simplemente para ocupar un espacio en el mismo. Cabe mencionar, que una de las ventajas es que este mecanismo logra controlar la subsidencia en la pérdida de elevación de la superficie (hundimiento); como sabemos al desocupar un espacio este debería ser reemplazado por algún fluido que sirva de soporte físico para las capas de roca que se encuentran encima de ellos.

3.3.1.4 Inyección subterránea del agua de producción ya tratada: Este método busca la recuperación de acuíferos utilizando la formación como almacenamiento, la idea es inyectar el agua de producción ya tratada a una formación subterránea. Este sistema tendría aplicación en el caso de que está prohibida el vertimiento de cualquier tipo de agua, sin embargo, debe cumplir con los estándares de calidad establecidos antes de proceso de inyección.

3.3.1.5 Uso del agua con fines industriales: En la actualidad el agua de producción es usada en varios procesos industriales, cabe señalar que esta debe cumplir con los estándares de calidad, así mismo, uno de los usos más comunes es el fracturamiento hidráulico y control de incendios.

3.3.1.6 Uso agrícola del agua: El gremio agrícola es uno de los que más consume agua y la mayoría de los campos se encuentran en sitios donde hay escases de este recurso, por tal motivo se puede utilizar cuando esta cumpla con lo exigencias de calidad de los usuarios, por tal motivo, se deben tener en cuenta 3 cosas, el contenido de sodio, la salinidad y toxicidad; con el fin de que esta no cause daños a los cultivos.

3.3.1.7 Agua de producción para uso doméstico: La aplicación de un tratamiento de agua de producción tiene como propósito convertir el agua en potable para que se pueda hacer uso doméstico de la misma. Este es de los usos con mayor restricción ya que los costos para eliminar la salinidad y otros contaminantes son excesivamente altos, cabe señalar que con el pasar de los años estos costos han disminuido.

3.3.2 Normas de calidad para el vertimiento de aguas en Colombia. La producción de crudo se encuentra asociada con el agua, por lo que es importante analizar a detalle la calidad de producción para evitar originar daños al ecosistema. Los entes encargados de regular y formular la política ambiental son el presidente de la República y el Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible.

3.3.2.1 Decreto 1594 de 1984: Por el cual se regula el uso del agua y residuos líquidos, permitiendo el control de los contaminantes que llegan a los cuerpos de agua vertidas hasta por 8 sectores económicos del país.

En este decreto se establecen condiciones y criterios como base de ordenamiento al uso de los recursos y las características de estos con el fin de mantener la calidad del agua. Las autoridades

ambientales son responsables de mantener el control de vertimiento de aguas sobre quienes desarrollen actividades industriales. La resolución 0631 de 2015 actualiza el decreto 1594 de 1984.

En el capítulo sexto, artículo 61 del mencionado decreto se estipula el control del vertimiento de los residuos líquidos, prohibiendo la reinyección de las aguas provenientes de la exploración y explotación del petróleo y del gas a los acuíferos siempre y cuando no se impida el uso actual o potencial del acuífero. A continuación, se presentan las normas de calidad que debe cumplir un líquido al momento de ser vertido en un cuerpo de agua.

Tabla 5.

Normas de vertimiento en Colombia según el decreto 1594 de 1984

Referencia	Usuario existente	Usuario nuevo
pH	5-9 unidades	5-9 unidades
Temperatura	£ 40 °C	£ 40 °C
Material flotante	Ausente	Ausente
Grasas y aceites	Remoción 80% en carga	Remoción 80% en carga
Solidos suspendidos, domésticos o industriales	Remoción 50% en carga	Remoción 80% en carga
Demanda bioquímica de oxígeno		
Para desechos domésticos	Remoción 30% en carga	Remoción 80% en carga
Para desechos industriales	Remoción 20% en carga	Remoción 80% en carga

Nota. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. (1984). Decreto 1594 de 1984. Usos del agua y residuos líquidos. Disponible en: http://www.ideam.gov.co/documents/24024/36843/Dec_1594_1984.pdf/aacbcd5d-fed8-4273-9db7-221d291b657f

3.3.2.2 Resolución 0631 de 2015: Según el artículo 11 de la resolución 0631 de 2015, por el cual se establecen parámetros sobre los límites máximos permisibles para el vertimiento a cuerpos de agua superficiales procedentes de actividades asociadas con los hidrocarburos convencionales,

aclarando en el parágrafo 2 que no está admitido el vertimiento de las aguas de producción para la actividad de exploración y producción de yacimientos no Convencionales.

Tabla 6.

Parámetros fisicoquímicos que se deben monitorear para las actividades de hidrocarburos según la resolución 0631 de 2015.

Parámetro	Unidades	Exploración (upstream)	Producción (upstream)	Refino	Venta y distribución (downstream)	Transporte y almacenami ento (midstream)
Generales						
pH	Unidades de pH	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00	6,00 a 9,00
Demanda Química de Oxígeno (DQO)	mg/L O ₂	400,00	180,00	400,00	180,00	180,00
Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO5)	mg/L O ₂	200,00	60,00	200,00	60,00	60,00
Sólidos Suspendidos Totales (SST)	mg/L	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00
Sólidos Sedimentables (SSED)	mL/L	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Grasas y Aceites	mg/L	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00
Fenoles	mg/L	0,20	0,20	0,20	0,20	0,20

Nota. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (marzo 17 de 2015). Resolución 631 de 2015. Disponible en: https://docs.supersalud.gov.co/PortalWeb/Juridica/OtraNormativa/R_MADS_0631_2015.pdf

4. Campo Rio Zulia

El agua asociada a la producción del campo Rio Zulia es uno de los problemas más significativos que se presenta hoy en día. Tratar la enorme producción de agua de este campo representa un aumento significativo en los costos para la compañía operadora. El objetivo de la construcción de un humedal artificial en este campo es la optimización del sistema de tratamiento actual del campo con el fin de lograr una mejor calidad del agua de vertimiento de acuerdo con la norma estipulada por el ministerio de medio ambiente.

4.1 Generalidades del campo

El campo Río Zulia, está localizado en la cuenca del Catatumbo, a 40 kilómetros de la ciudad de Cúcuta, en el corregimiento de Agua Clara y es operado por la compañía iberoamericana de hidrocarburos CQ exploración y producción S.A.S con un total de 38 pozos perforados los cuales son 13 activos, 7 inactivos, 15 abandonados, y 3 exploratorios abandonados, con una producción aproximada de 428 bpd de crudo de 37° API. En la tabla 10 se presenta las coordenadas de ubicación de la estación principal del campo Rio Zulia.

Tabla 7.

Ubicación del campo Rio Zulia

Vértice	Este	Norte
1	1182531	1404013
2	1178864	1403993
3	1175557	1398411
4	1176429	1393998
5	1179143	1394613
6	1182531	1401453

Nota. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (Junio 27 de 2018). Resolución 702 de 2018. Disponible en: <https://www.habitatbogota.gov.co/noticias/resoluci%C3%B3n-702-2018-0>

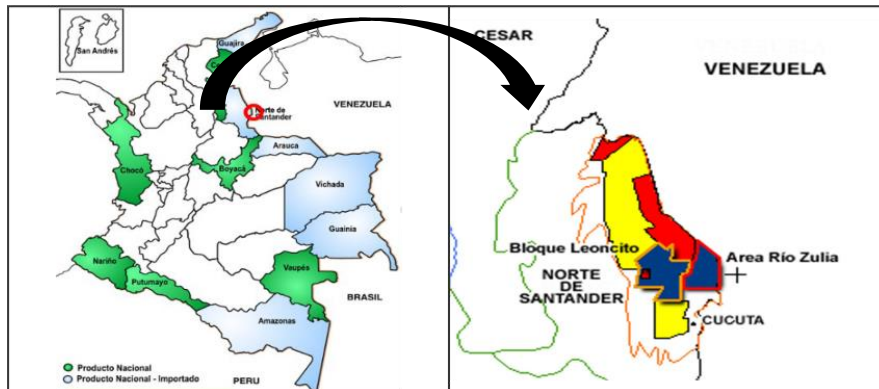


Figura 5. Ubicación geográfica del campo Rio Zulia. Adaptado de Consorcio Internacional de Ingeniería. (junio de 2.008). *Evaluación de facilidades campo Río Zulia. Gerencia Regional Norte. Informe Preconceptual. Bogotá*

Tabla 8.

Pozos del campo Rio Zulia

Pozos	Nombre	Pozos	Nombre
Activos	RZ-06	Abandonados	RZ-01
	RZ-14		RZ-04
	RZ-19		RZ-07
	RZ-20		RZ-08
	RZ-21		RZ-09
	RZ-02		
Inactivos	RZ-03		
	RZ-05		RZ-1W
	RZ-18		RZ-3W
	RZ-25	RZ-4W	
	RZ-26	-	
	RZ-27	-	

Nota. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (junio 27 de 2018). Resolución 702 de 2018. Disponible en: <https://www.habitatbogota.gov.co/noticias/resoluci%C3%B3n-702-2018-0>

Para conocer las condiciones ambientales del campo, se realizó un análisis a partir de registros tomados en la estación meteorológica 1603501 Tibú, obteniendo así la información presente en la tabla 9.

Tabla 9.

Características climatológicas del campo Rio Zulia

Clima	Tropical húmedo
Humedad relativa	Máxima 85%
	Mínima 90%
Temperatura promedio	27,45 °C
Precipitación promedio	65,5 mm/h
Altitud	62 msnm

Nota. Superintendencia de Facilidades de Superficie. (2007). Especificación técnica suministro de recipientes a presión”, gerencia técnica y de desarrollo de E&P – Ecopetrol S.A.

4.1.1 Captación de agua subterránea del campo Río Zulia. El campo tiene permiso mediante la Resolución No. 738 del 25 de octubre de 2017 para captar agua subterránea con un caudal de 18,4 litros por segundo como beneficio de las actividades petroleras allí desarrolladas mediante el pozo RZ-18 desde los acuíferos de la formación barco, mirador y carbonera. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

4.1.2 Actividad que genera el vertimiento de aguas residuales del campo Río Zulia. Las actividades de producción, tratamiento y fiscalización de hidrocarburos generan de manera directa o indirectamente aguas residuales del campo, las cuales deben ser tratadas y dispuestas para dar cumplimiento a las normas ambientales establecidas en el país. Las aguas residuales provienen de las aguas aceitosas de la producción y tratadas en el separador API de las estaciones GS1 y GS2, las cuales deben ser tratadas previo a su vertimiento al caño NN1 afluente del caño mono. (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2018)

4.2 Descripción de los procesos de tratamientos actuales del campo

El sistema de tratamiento de agua actual del campo comprende elementos y procesos que se dan en los separadores de agua libre (FWKO), separadores API y piscinas de oxidación. El campo Río Zulia con una estación principal y dos subestaciones (GS1, GS2) que se conectan a la primordial.

Estas subestaciones se encargan de recolectar la producción de los diferentes pozos, donde el propósito principal es llevar a cabo la primera etapa de disgregación, aquí se separa la mayor cantidad de gas, agua y crudo, para ser enviado a la estación principal donde se continúa con el proceso de separación en una segunda y tercera etapa.

La estación principal tiene una capacidad de separación primaria total 108 MBFPD con cuatro separadores trifásicos generales en funcionamiento y otros dos en reserva y una capacidad secundaria de 75 MBFD mediante un FWKO. Las piscinas de estabilización y enfriamiento 1 y 2 tienen una capacidad de almacenamiento de 7.300 y 69.300 barriles, cabe señalar que estas se mantienen bajo mantenimiento rutinario programado con el fin de mantener su eficiencia e integridad en el proceso.

4.2.1 Estación de tratamiento GS1. La estación está ubicada en el sector Norte del campo, en este lugar se recibe en promedio una producción de 7.872 barriles de agua por día. Esta subestación se dispone de un múltiple que es el encargado de recibir los fluidos que vienen de los 5 pozos del campo, para así llevarlos, por medio de los colectores, a los separadores donde se lleva a cabo la primera etapa de separación.



Figura 6. Estación de tratamiento GS1. Adaptado de Nota. Superintendencia de Facilidades de Superficie. (2007). Especificación técnica suministro de recipientes a presión”, gerencia técnica y de desarrollo de E&P – Ecopetrol S.A.

Tabla 10.

Producción por pozo de la estación GS1

Pozo	Sistema de producción	°API	Producción			Línea de flujo
			Crudo (bpd)	Agua (bpd)	Gas (KPCD)	Diám. (pulg)
RZ-06	Bombeo Hidráulico	41	84	52	5	4
RZ-19	Gas Lift	41	60	2360	60	4
RZ-21	Bombeo Hidráulico	41	45	932	2	4
RZ-29	Bombeo Hidráulico	41	121	1737	7	4
RZ-31	Bombeo Hidráulico	41	87	2811	19	4
Producción total			397	7872	93	-

Nota. Nota. Superintendencia de Facilidades de Superficie. (2007). Especificación técnica suministro de recipientes a presión”, gerencia técnica y de desarrollo de E&P – Ecopetrol S.A.

La estación GS1 tiene implementado un sistema de facilidades, en donde recibe el fluido proveniente de los pozos, un sistema de separación con 3 separadores horizontales, uno es un WET trifásico, otro un DRY funcionando como bifásico y por ultimo un separador de prueba bifásico que tiene como función principal hacer seguimiento a las caídas de producción de los pozos; en la salida de cada separador hay una boquilla para realizar la inyección de químicos y romper la emulsión, también tienen un sistema de reinyección de agua, un scrubber para el manejo del gas con el fin de poder utilizarlo como combustible. Por último, se encuentra un sistema de recuperación de hidrocarburos conocido como separador API.

Tabla 11.

Facilidades de la subestación GS1

Etapa	Equipo	Cantidad	Capacidad de diseño
Recibo	Múltiples de llegada	4	-
	Separador de prueba	1	4500 Bls
Separación	Separador WET	1	17.000 Bls
	Separador DRY	1	17.000 Bls
Reinyección de agua	Tanque de almacenamiento	1	1.000 Bls
	Bombas de inyección	1	5 unidades
Recuperación de hidrocarburo	Separador API	1	-

Nota. ECOPETROL S.A. (2010). Manual de operaciones de La Estación GS1”, Exploración y producción

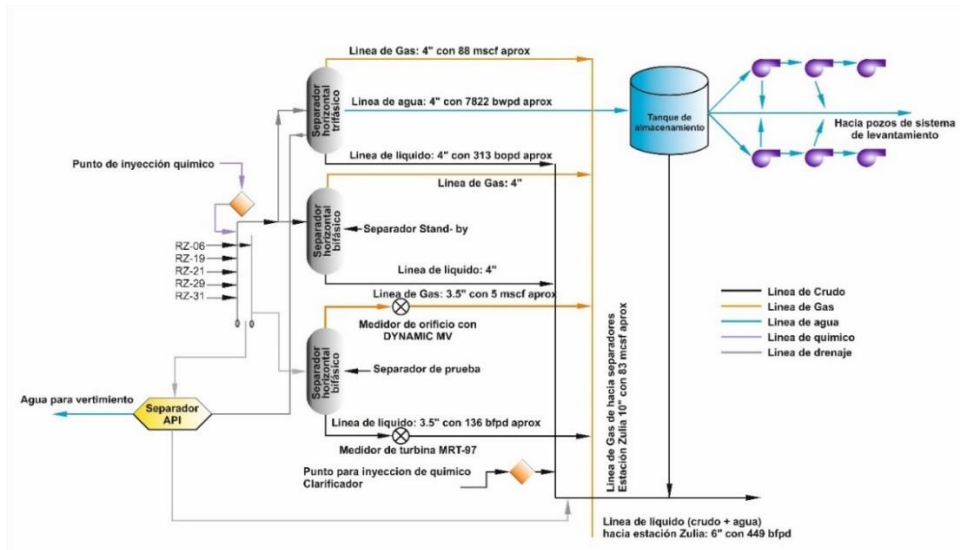


Figura 7. Facilidades de la subestación GS1. Adaptado de ECOPETROL S.A. (2010). Manual de operaciones de La Estación GS1”, Exploración y producción

4.2.2 Estación de tratamiento GS2



Figura 8. Estación de tratamiento GS2. Adaptado de ECOPETROL S.A. (2010). Manual de operaciones de La Estación GS1”, Exploración y producción

La subestación GS2 está ubicada al sudoeste del campo y recibe en promedio una producción de 13.239 bpd de agua. Esta dispone de un múltiple de producción, encargado de recibir el fluido de 8 pozos del campo Rio Zulia y llevarlos a través de colectores, a los separadores donde se desarrolla la primera etapa de separación.

Tabla 12.

Producción por pozo de la estación GS2

Pozo	Sistema De producción	°API	Producción			Línea de flujo	
			Crudo (bpd)	Agua (bpd)	Gas (KPCD)	Diám. (pulg)	Long. (m)
RZ-03	Gas Lift	41	23	985	18	4	875,0
RZ-05	Gas Lift	41	64	3914	57	4	421,0
RZ-14	Gas Lift	41	24	667	8	4	1053,1
RZ-20	Gas Lift	41	74	843	54	4	525,9
RZ-23	Gas Lift	41	46	1717	46	4	943,8
RZ-24	Gas Lift	41	39	931	40	4	940,0
RZ-30	Gas Lift	41	54	1.304	46	4	650,0
RZ-32	Bombeo Hidráulico	41	111	630	45	4	1510,0
RZ-33	Bombeo Hidráulico	41	41	2248	39	4	1.013,9
Producción total			476	13.239	353		

Nota: ECOPETROL S.A. (2010). Manual de operaciones de La Estación GS2”, exploración y producción

En la estación GS2 se tiene implementado un sistema de facilidades, en donde se reciben los fluidos, un sistema de disgregación con 3 separadores horizontales. El separador WET como el DRY que se encuentran funcionando, como bifásico y un separador de prueba también bifásico

que tiene como función principal hacer seguimiento a las caídas de producción de los pozos; y por último hay un sistema de recuperación de hidrocarburos más conocido como separador API.

Tabla 13.

Facilidades instaladas en la estación GS2

Etapa	Equipo	Cantidad	Capacidad de diseño
Recibo	Múltiples de llegada	4	-
	Separador de prueba	1	4.500 Bls
Separación	Separador WET	1	17.000 Bls
	Separador DRY	1	17.000 Bls
Recuperación de hidrocarburo	Separador API	1	-

Nota. ECOPETROL S.A. COI, (2008). Evaluación de facilidades Campo Río Zulia”, Gerencia Regional Norte - Informe Preconceptual

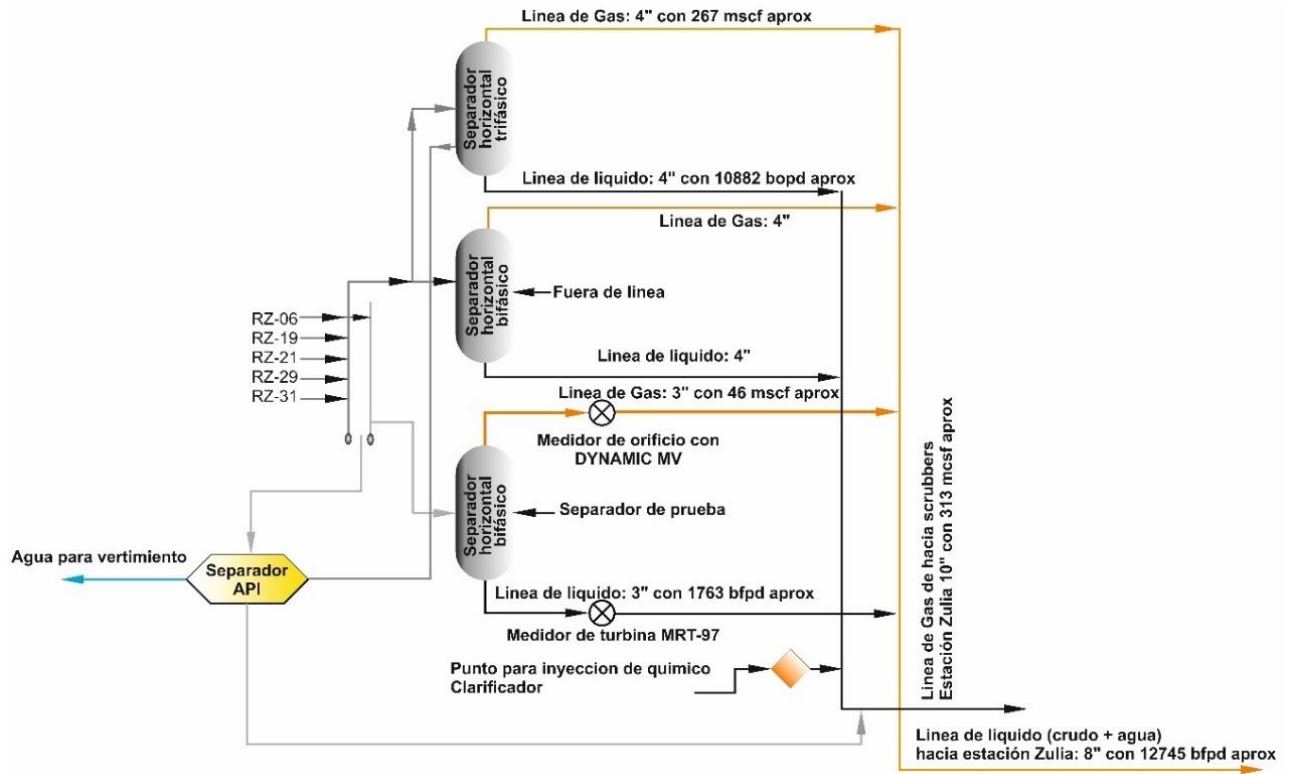


Figura 9. Facilidades instaladas en la estación GS2. Adaptado de ECOPETROL S.A. COI, (2008).

Evaluación de facilidades Campo Río Zulia”, Gerencia Regional Norte - Informe Preconceptual

4.2.3 Estación principal



Figura 10. Estación principal. ECOPETROL S.A. (2010). Estación principal. Adaptado de Manual de operaciones y procedimientos de la estación principal”, Exploración y producción

La estación principal se encuentra ubicada al extremo occidental del campo, allí se recibe aproximadamente 700 bpd de crudo y una producción bruta de 18.000 bfpd, en este lugar se recogen los fluidos de las subestaciones GS1 y GS2 y se lleva a cabo la segunda y la tercera etapa de separación las cuales permitirán que posteriormente se envíe el crudo a la zona de fiscalización de producción.

El sistema de facilidades de la estación principal cuenta con dos separadores horizontales y uno vertical, donde se realizan las etapas de separación. El hidrocarburo proveniente de esta etapa es redireccionado a los tanques de almacenamiento y por último se despacha al oleoducto.

El agua proveniente de los separadores de esta estación se dirige a un FWKO, luego es llevado a una torre de enfriamiento para disminuir la temperatura de estos fluidos y posteriormente se direcciona hacia el separador API; donde se retira el aceite que pueda haber sido arrastrado. Finalmente, los fluidos son llevados a las piscinas de oxidación para darle vertimiento hacia los cuerpos de agua. Las salidas de gas del scrubber son utilizadas como combustible en el campo y otra parte es quemada como desecho

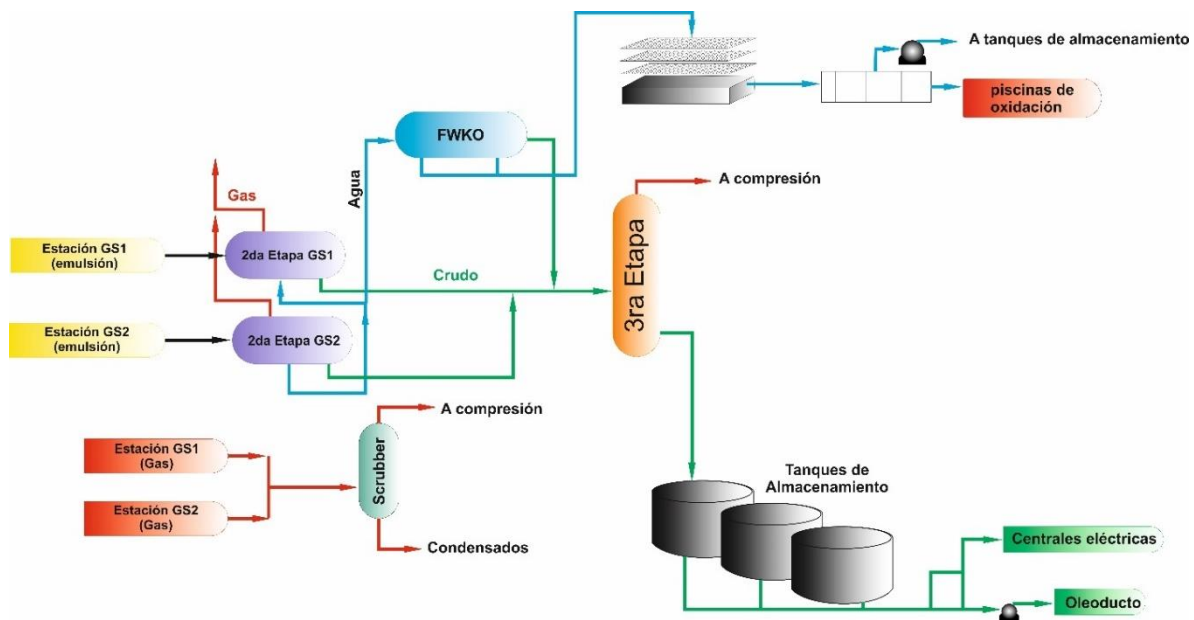


Figura 11. Sistema de tratamiento de aguas residuales campo Río Zulia. Adaptado de ECOPEPETROL S.A., COI. (2008)., Evaluación de facilidades Campo Río Zulia”, Gerencia Regional Norte –Informe Preconceptual

El sistema de tratamiento de agua de la estación principal tiene como función principal hacer que el agua cumpla con las condiciones adecuadas para que pueda ser vertida a los cuerpos de agua, el agua proveniente de FWKO conecta con este sistema de tratamiento. La torre de

enfriamiento es la etapa más importante para el tratamiento por los elevados contenidos de parafina que se encuentran disueltas a la temperatura de producción del yacimiento, la estructura de esta tiene como objetivo eliminar sólidos e hidrocarburos para evitar que nos generen daños o taponamientos.



Figura 12. Sistema de tratamiento de agua

El agua que sale de la torre sigue su recorrido hacia 4 piscinas de remoción de parafinas donde se aumenta el tiempo de residencia para lograr la separación por gravedad y recolectar las trazas de aceite en la parte superior por medio de flautas para que el agua sea conducida al separador API.

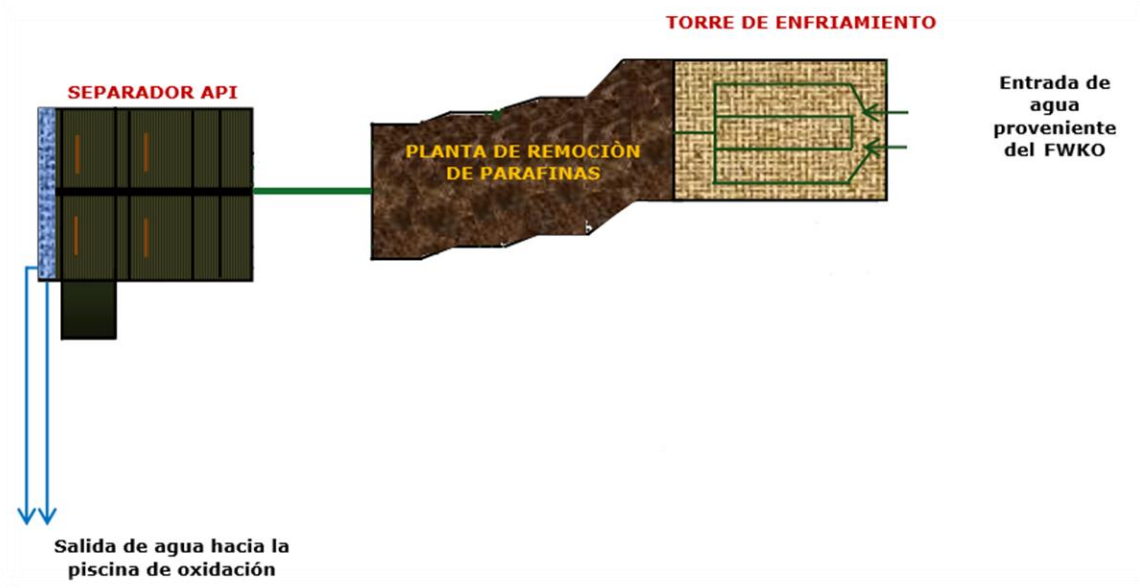


Figura 13. Sistema de tratamiento de aguas residuales campo Rio Zulia. Adaptado de ECOPETROL S.A. (2010). Manual de operaciones y procedimientos de la estación principal”, exploración y producción

4.3 Caudales del campo Rio Zulia

4.3.1 Caudales de la subestación GS1. La capacidad del líquido en el separador (DRY & WET) es de 17.000 barriles de fluido por día (bfpd), mientras que la capacidad del gas en el mismo separador es de 40 MMscf/día

Tabla 14.

Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1.

Equipo	Descripción	L x D (ft)	No.	pdis (psig)	poper (psig)	Tiempo de retención (min)	Capacidad instalada (bfpd)/(mmscf/día)
Dry & Wet	Separador trifásico horizontal de gral	15 x 4	2	125	90	3	17000/40
Test	Separador bifásico horizontal de prueba	15 x 3	1	125	100	3	4500/15

Nota. Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1. *Recuperado de: “OGS Colombia campo Río Zulia”

Tabla 15.

Manejo de la producción en la estación GS1

Equipo	Descripción	Caudal actual (bfpd)	Aceite actual (bpd)	Agua actual (bpd)	Gas actual (kscf/día)	Capacidad usada (%)
Dry	Separador bifásico horizontal	13.225	220	13.005	60	156
Wet	Separador trifásico horizontal	9.935	240	9.695	700	117

Nota. Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1. *Recuperado de: “OGS Colombia campo Río Zulia”

4.3.2 Caudales de la subestación GS2. La capacidad del líquido en el separador (DRY & WET) es de 17000 barriles de fluido por día (bfpd), mientras que la capacidad del gas en el mismo separador es de 40 MMscf/día

Tabla 16.

Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS2.

Equipo	Descripción	LxD (pies)	No	pdis (psig)	poper (psig)	Tiempo de retención (min)	Capacidad instalada (bfpd)/(mmscf/día)
Dry &Wet	Separador bifásico	15 x 4	2	125	90	3	17000/40
	horizontal de gral						
Test	Separador bifásico	15 x 3	1	125	100	3	4500/15
	horizontal de prueba						

Nota. Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1. *Recuperado de: “OGS Colombia campo Río Zulia”

Tabla 17.

Manejo de la producción en la estación GS2.

Equipo	Descripción	Caudal actual (bfpd)	Aceite actual (bpd)	Agua actual (bpd)	Gas actual (kscf/día)	Capacidad usada (%)
Dry	separador bifásico	7.400	390	7.010	2.800	87
	horizontal de gral					
Wet	separador bifásico	6.840	340	6.510	2.465	80
	horizontal de gral					

Nota. Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1. *Recuperado de: “OGS Colombia campo Río Zulia”

4.3.3. Caudales de la estación principal.

Tabla 18.

Datos de diseño y capacidad instalada en la estación principal.

Equipo	Descripción	I x D (pies)	No	pdis (psig)	poper (psig)	Tiempo de retención (min)	Capacidad instalada (bfpd)/(mmscf/día)
2 ^{da} etapa gs1	Separador trifásico horizontal	20 x 6	1	125	35	3	20.000/25
2 ^{da} etapa gs2	Separador trifásico horizontal	20 x 6	1	125	35	3	20.000/25
FWKO	Separador de agua libre	30 x 10	1	50	15	3	75.000/25
3 ^{ra} etapa	separador bifásico vertical	30 x 8	1	125	5	3	25.000/15
Scrubber	separador bifásico vertical	12 x 7	1	150	70	3	0/50

Nota. Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1. *Recuperado de: "OGS Colombia campo Río Zulia"

Tabla 19.

Manejo de la producción en la estación principal.

Equipo	Descripción	Caudal actual (bfpd)	Aceite actual (bpd)	Agua actual (bpd)	Gas actual (kscf/día)	Capacidad usada (%)
2 ^{da} etapa GS1	Separador trifásico horizontal	13360	460	13185	15	67
2 ^{da} etapa GS2	Separador trifásico horizontal	14240	720	13500	25	71
FWKO	Separador de agua libre	27600	5	24685	5	37
3 ^{ra} etapa	Separador bifásico vertical	3500	1180	2000	2	14
Scrubber	Separador bifásico vertical	0	0	0	6.025	12

Nota. Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1. *Recuperado de: "OGS Colombia campo Río Zulia"

Tabla 20.

Almacenamiento de la estación principal.

Equipo	Descripción	H x D (pies)	Cantidad	Capacidad almacenamiento (bls)
Tanques	Almacenamiento de crudo	30 x 256	3	90.000

Nota. Datos de diseño y capacidad instalada en la estación GS1. *Recuperado de: "OGS Colombia campo Río Zulia"

Tabla 21.

Resumen de los equipos para tratamiento de aguas residuales industriales (ARI) del campo Rio Zulia.

Equipos	Cantidad	Capacidad (barriles)	Ubicación
Separadores horizontales 6´x20´ principal o de segunda etapa	1	25.000	Estación principal
Separadores horizontales 6´x20´ principal o de segunda etapa	1	25.000	Estación principal
Separador vertical 8´x30´	1	25.000	Estación principal
Separador de agua libre Fwko 10´x30´	1	25.000	Estación principal
Separadores de tercera etapa 40´x8´	1	50.000	Estación principal
Torre de enfriamiento	1		Estación principal
Separador API	1	470	Estación principal
Piscina de oxidación 1	1	7.300	Estación principal
Piscina de oxidación 2	1	69.300	Estación principal
Separador horizontal 4´x15´	1	17.000	Estación GS-1
Separador horizontal 4´x15´	1	17.000	Estación GS1
Separador horizontal 3´x15´	1	5.000	Estación GS-1
Separador API de 2 cámaras	1	226	Estación GS-1
Piscina de oxidación 1	1	3.990	Estación GS-1
Tanque Kobe	1	1.000	Estación GS-1
Separador horizontal 4´x15´	1	17.000	Estación GS-2
Separador horizontal 4´x15´	1	17.000	Estación GS-2
Separador horizontal 3´x15´	1	5.000	Estación GS-2
Separador API de 2 cámaras	1	243	Estación GS-2
Piscina de oxidación 1	1	3.990	Estación GS-2

Nota. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (junio 27 de 2018). Resolución 702 de 2018. Disponible en: <https://www.habitatbogota.gov.co/noticias/resoluci%C3%B3n-702-2018-0>

4.4 Análisis del contenido fisicoquímico de aguas residuales del campo Río Zulia

Análisis realizados por la corporación autónoma regional (CORPONOR) a muestras de agua tomadas a la entrada del separado API y en la descarga de las piscinas de oxidación de las estaciones de tratamiento del campo Río Zulia y en los cuerpos de agua caño NN1 afluente del caño Mono se evidencian contaminantes tales como grasas y aceites, sólidos suspendidos, metales pesados, fenoles y cianuro. Estos hallazgos fueron obtenidos en octubre del 2017 con la finalidad de supervisar el contenido de las aguas residuales industriales de la estación principal y las subestaciones GS1 y GS2 de acuerdo con el capítulo VI, artículo 11 de la resolución 0631 de 2015 del ministerio de medio ambiente.

Tabla 22.

Caracterización y parámetros fisicoquímicos del vertimiento.

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	Limite permisible según la resolución 0631 de 2015
pH	Unidades	7,04	7,8	6,0-9,0
Color real	m-1	0,73	1,429	Análisis y reporte
Acidez total	mg/L CaCO ₃	28,26	6,17	Análisis y reporte
Alcalinidad total	mg/L CaCO ₃	299	182	Análisis y reporte
Dureza total	mg/L CaCO ₃	16,56	13,23	Análisis y reporte
Cloruros	mg/L Cl ⁻	102	61,5	1.200,00
Sulfatos	mg/L SO ₄ ⁻²	<5	<5	300
Fosfatos	mg/L P-PO ₄	<0,003	0,107	1
Nitrógeno total	mg/L N	<3	<3	N.E.
Fosforo total	mg/L P	<0,1	0,23	Análisis y reporte
Cianuro total	mg/L CN ⁻	<0,2	<0,2	1
Fenoles totales	mg/L	0,164	<0,06	0,2
Sólidos suspendidos	mg/L	65	55	50

Tabla 22. (Continuación)

Parámetros	Unidades	Entrada	Salida	Limite permisible según la resolución 0631 de 2015
DBO ₅	mg/L O ₂	70	22	60
DQO	mg/L O ₂	108	40	180
Arsénico	mg/L	<0,01	<0,01	0,1
Bario	mg/L	0,718	<0,6	Análisis y reporte
Cromo total	mg/L	<0,11	<0,11	0,5
Mercurio	mg/L	<0,002	<0,002	0,01
Grasas y aceites	mg/L	1,69	<1,40	15
Hidrocarburos totales	mg/L	1,47	<1,4	10
BETEX	mg/L	0,086	<0,05	Análisis y reporte

Nota. Nota. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (junio 27 de 2018). Resolución 702 de 2018. Disponible en: <https://www.habitatbogota.gov.co/noticias/resoluci%C3%B3n-702-2018-0>

5. Consideraciones del diseño

Para el desarrollo de esta investigación, se determinaron una serie de parámetros importantes en el diseño de un humedal artificial, entre los cuales se encuentran; la demanda química de oxígeno, los sólidos suspendidos totales y el caudal de entrada, grasas y aceites.

En ese sentido, la remoción dichos parámetros y la eficiencia de los humedales artificiales de tipo superficial y tipo subsuperficial se pueden ver comparados en la tabla 23; la cual hace la comparación entre varios casos con la eficacia que han tenido en los respectivos proyectos. Así mismo, se determinó que el humedal artificial adecuado para este proyecto es de tipo subsuperficial de flujo horizontal debido a su alta eficiencia en la remoción de grasas, aceites, y solidos *suspendidos totales

Tabla 23.

Eficiencia de remoción de los humedales artificiales de flujo superficial y subsuperficial en ubicaciones no especificadas

Tipo de humedal	Demanda bioquímica de oxígeno			solidos suspendidos totales			grasas y aceites		
	Conc. Prom. (mg/L)		Eficiencia (%)	Conc. Prom (mg/L)		Eficiencia (%)	Conc. Prom (mg/L)		Eficiencia (%)
	Entrada	Salida		Entrada	Salida		Entrada	Salida	
	Entrada	Salida		Entrada	Salida		Entrada	Salida	
Flujo superficial	79,4	12,4	84	106	11,7	89	2,1	0,13	94
Flujo superficial	11,3	5,1	55	19,2	27	-44	2,5	1	60
Flujo superficial	38	15,3	60	181	41	77			
Flujo superficial							0,84	0,29	65
Flujo subsuperficial	700	20	97						

Tabla 23. (Continuación)

Tipo de humedal	Demanda bioquímica de oxígeno			solidos suspendidos totales			grasas y aceites		
	Conc. Prom. (mg/L)		Eficiencia (%)	Conc. Prom (mg/L)		Eficiencia (%)	Conc. Prom (mg/L)		Eficiencia (%)
	Entrada	Salida		Entrada	Salida		Entrada	Salida	
	Flujo								
Flujo superficial	104	2,1	98	14,5	2,4	83			
Flujo subsuperficial	75	15	80	38	20	47	24	11	54

Nota. Covarrubias, N., Miura, P., Mayor, J., Urich, J., Guevara, O., Ortega, J., . . . Quiñonez, R. (1998). *Modular Road, An Access Option For Wetland Environments*. Society of Petroleum Engineers, Inc.

5.1 Modelo general de diseño

En cuanto a la definición de un humedal artificial cabe señalar que se puede entender como un reactor biológico y cuyo patrón de flujo puede ser parecido al de un reactor con flujo pistón en que se considera que el tiempo de estancia de las partículas que entran al sistema es constante (modelo *P-K-C*). En ese sentido, el diseño del humedal propuesto en el presente trabajo sugiere su funcionamiento como método de tratamiento complementario al tratamiento primario; una vez el agua de producción haya pasado por procesos de desmulsificación, separadores y tanques desnatadores.

Por tal motivo, durante el diseño de humedales artificiales se precisa conocer los caudales de agua a tratar necesarios para establecer la penetración del tratamiento primario, al igual que las concentraciones iniciales y finales que se desea alcanzar y la temperatura promedio del lugar donde se instalará el humedal. En cuanto a las variables de diseño considerables en un humedal artificial

cabe señalarse que son: el tiempo de retención hidráulico, la profundidad del agua, longitud y anchura del humedal.

Así mismo, el tamaño del humedal diseñado proviene del modelo $P-K-C$ que caracteriza el rendimiento del humedal calculado a través de la ecuación 1 que se presenta a continuación. La mayoría de las reacciones ocurridas en un humedal corresponden a una cinética de primer orden que contiene un coeficiente de velocidad K ; para ciertos parámetros como la demanda química de oxígeno y la concentración de fondo inherente al sistema del humedal. (Abdi Kabadeh, 2014)

$$A_w = \left[\left(\frac{C_o - C^*}{C_i - C^*} \right)^{\frac{1}{p}} - 1 \right] \times \frac{P \times Q}{K} \text{ Ecuación 1}$$

A_w = área del humedal

C_o = Concentración de salida, mg/L

C_i = Concentración de entrada, mg/L

C^* = Concentración en el fondo, mg/L

P = Numero aparente de tanques en serie

K = Coeficiente areal de primer orden a temperatura específica, m/año

Q = caudal de entrada

El número aparente de tanques en serie reúne los efectos de los contaminantes y la eficiencia hidráulica del proyecto, por tanto, este es un valor que varía en un rango de 3 a 6; siendo utilizado 3 para diseños de pilotos y 6 para humedales que se dispongan como método de tratamiento de alta eficiencia de depuración de aguas residuales industriales.

La ecuación 2 representa el balance de masa en el humedal artificial y es la ecuación base para el cálculo de remoción de contaminantes en un humedal artificial de flujo subsuperficial según Kladlec y Knight

$$\left(\frac{C-C^*}{C_i-C^*}\right) = \frac{1}{\left(1+\frac{K}{Pq}\right)^P} \text{ Ecuación 2}$$

Tabla 24. Valores de los parámetros requeridos según Kadlec and Knight (1996)

Humedales de flujo subsuperficial	
	DBO ₅
K_T	$0,2779 \times (1,06)^{T-20}$
C*	$3,5 + 0,053 \times C_o$

5.2 Caudal de diseño

Como caudal base para el diseño del humedal artificial se ha tomado un valor 10.454 m³ /día en el campo Rio Zulia, la cual puede ser revisada en la resolución 702 del 27 de junio de 2018, en esta resolución se resuelve la ampliación del caudal de vertimiento de este campo debido a la perforación de nuevos pozos y la realización de actividades de mantenimiento y reacondicionamiento (workover) en pozos ya desarrollados, lo que ha generado un aumento considerable en la producción de agua directa del proceso de producción petróleo.

Esta resolución se acoge al artículo 2.2.3.3.5.9 del decreto 1076 de 2015, por el cual se permiten presentar modificaciones al permiso de vertimiento, dando aviso inmediato a la autoridad ambiental competente, obteniendo como respuesta; la renovación del permiso a la empresa

IBEROAMERICANA DE HIDROCARBUROS S.A., para las descargas del agua producto de actividad petrolera en Rio Zulia al cuerpo de agua llamado Caño NN1 afluente del caño Mono con un caudal de ciento veinte litros por segundo (10.454 m³/día) según la normatividad ambiental vigente.

5.3 Selección del medio granular

El medio filtrante o lecho generalmente se construye con dos tipos de gravas diferentes a la entrada y salida. De esta manera una grava gruesa que recibe el afluente y efluente con diámetros de hasta 50 milímetros y en medio una grava que puede ser tan pequeña como unos 4 milímetros de diámetro.

Tabla 26.

Características normales de un medio poroso de humedales de flujo subsuperficial

Tipo de material	Tamaño efectivo D10 (mm)	Porosidad, n (%)	Conductividad hidráulica, ks (m ³ /m ² /d)
Arena gruesa	2	28-32	100-1.000
Arena gravosa	8	30-35	500-5.000
Grava fina	16	35-38	1.000-10.000
Grava media	32	36-40	10.000-50.000
Roca gruesa	128	38-45	50.000-250.000

Nota. Pech, OMS.; Ocaña - Kuxulkab', GL. (2014). Tratamiento de Aguas Residuales mediante Humedales Artificiales. *Revistas.ujat.mx*.

5.4 Membranas

El uso de membranas en la construcción de humedales se da principalmente con el fin de evitar la filtración de las aguas residuales a zonas más profundas que las diseñadas en el humedal, también suelen ser utilizadas como arcilla cumplimiento la función de material sellante. La selección de la membrana se da debido a su disponibilidad, ya que materiales sintéticos como el PVC de espesores 0,5 milímetros o mas no permiten el flujo de agua fuera de los límites calculados para el humedal.

5.5 Paredes laterales

Los bordes o paredes laterales de los humedales construidos suelen ser de tierra, ladrillo o cemento los cuales brindan estabilidad al humedal y soporte a la instalación de la membrana. El uso de cemento es común en la construcción de humedales artificiales debido a que este material brindar estabilidad en las paredes, sin embargo, suele ser más costoso, sobre todo cuando el humedal requiere grandes superficies.

Tabla 27.

Parámetros y valores de diseño

Parámetro	Valor	Fuente
Coefficiente areal de primer orden para DBO (K_{DBO}), m/d	0.469	Kladec y Wallace, 2009
Numero aparente de tanques en serie (P)	3	Davis yWallace, 2009
Concentración de entrada para DBO ₅ (C_{iDBO}), mg/L	70	Resolución 702 de 27 junio de 2018, ministerio de medio ambiente
Concentración de salida para DBO ₅ (C_{DBO}), mg/L	20	MADS
Concentración de fondo para DBO ₅ (C^*_{DBO}), mg/L	7,21	Kladec y Wallace, 2009
Caudal de agua (Q), m ³ /d	10.454	(Consortio Internacional de Ingenierías, 2008)
Medio filtrante	Grava media de 32 mm	(Pech & Ocaña - Kuxulkab', 2014)
Vegetación	Cyperus articulatus	(Pech & Ocaña - Kuxulkab', 2014)
Profundidad del lecho (mts)	0,6	(Pech & Ocaña - Kuxulkab', 2014)
Porosidad del medio filtrante	0,4 (Pech & Ocaña - Kuxulkab', 2014)	(Pech & Ocaña - Kuxulkab', 2014)
Membrana (mm)	0,76, PVC	(Pech & Ocaña - Kuxulkab', 2014)

Tabla 27. (Continuación)

Parámetro	Valor	Fuente
Conductividad hidráulica	13.500	(Pech & Ocaña - Kuxulkab', 2014)
Pendiente	2%	(Pech & Ocaña - Kuxulkab', 2014).

5.6 Tamaño y área del humedal artificial

Aplicando los parámetros de tabla 27 en la ecuación 1 se tiene que el área superficial requerida para la construcción del humedal es de 46.780 m² la cual se podrían aproximar a un valor de 53.797 m² por sugerencia de Kadlec y Knighth al estimar un 15% más de área superficial, con el fin de prever posibles aumentos en el caudal de producción de agua o escorrentías provenientes de las aguas lluvias.

$$A_w = \left[\left(\frac{20 - 7,21}{70 - 7,21} \right)^{\frac{-1}{3}} - 1 \right] \times \frac{3 \times 10.454}{0,469}$$

$$A_w = 46.780 \text{ m}^2$$

$$A_w = 1,15 \times 46.780 \text{ m}^2$$

$$A_w = 53.797 \text{ m}^2$$

5.7 Dimensiones del humedal

Las celdas son una relación largo-ancho que presentan una importancia tan decisiva en el diseño que puede garantizar o no la eficiencia del humedal. Generalmente están son cuadradas con una relación ancho largo igual a 1 con la finalidad de distribuir de manera uniforme el flujo del efluente y evitar obstrucciones en el flujo.

Cabe mencionar que la profundidad de la celda es siempre menor a la profundidad del diseño del humedal o la máxima penetración de las raíces de la vegetación instalada; ya que de ella depende si estas pueden penetrar la membrana.

Sin embargo, la mínima profundidad de la celda debe ser 30 centímetros, debido a que profundidades menores pueden hacer que el flujo se desplace a la superficie.

La ecuación 1 describe el largo y el ancho del sistema.

$$W * L = A_w \quad \text{Ecuacion 3}$$

$$0,8 = \frac{L}{W} \quad \text{Ecuacion 4}$$

W= ancho del humedal

A_w = área superficial del humedal

L = longitud del humedal

Aplicando las ecuaciones 3 y 4 obtenemos el largo y el ancho del humedal artificial, valores que nos será útil para estimar las dimensiones de las celdas que compondrán el humedal artificial. Se utilizó una relación de 0,8 ya que se sugiere una relación largo/ancho del humedal con valores cercanos a 1.

$$W = 259,5 \text{ m}$$

$$L = \frac{53.800}{259,5} = 207,5 \text{ m}$$

Por tal motivo, se sugiere construir un humedal compuesto por 12 trayectorias de flujo en paralelo con 3 celdas en serie cada una, con el fin de mejorar la distribución de flujo en el humedal construido, evitar problemas de colmatación y reducir la presión a la salida de los tubos para minimizar el riesgo de erosión del sistema.

Al realizar este arreglo se puede estimar un largo de 207,5 metros y un ancho de 259,5 metros como dimensiones ideales del sistema, obteniendo finalmente un área superficial de 53.800 m² y 36 celdas en total.

Tabla 28.

Configuración de diseño del humedal artificial

Parámetro	Selección de diseño
Pendiente	2%
Configuración y disposición	12 trayectorias de flujo en paralelo
	3 celdas en serie
Área total del humedal	53.800 m ²
Dimensiones del sistema	Ancho 259,5 m
	Largo 207,5 m
Número de celdas	36
Dimensión de cada celda	Ancho 21,6 m
	Largo 69,2 m
Profundidad del lecho	0,6 m

Tabla 28. (Continuación)

Parámetro	Selección de diseño
Granulometría	Grava gruesa de 32 mm en la zona de entrada y la zona de la salida. Grava fina de 16 mm en la zona media
Membrana	Material PVC Espesor 0,76 mm
Paredes laterales	Cemento
Vegetación	Cyperurus articulatus
Estructura de control	Compuertas de control a la entrada y salida del sistema
Conductividad hidráulica	13.500 m/d

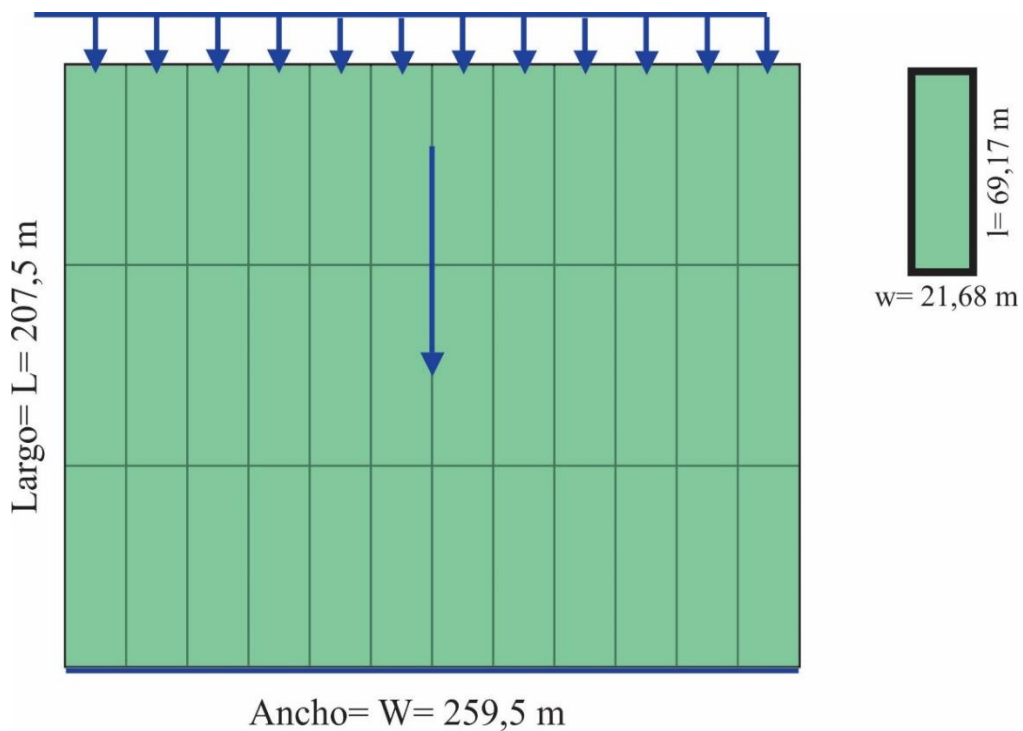


Figura 14. Esquema de implementación del HCFSSH

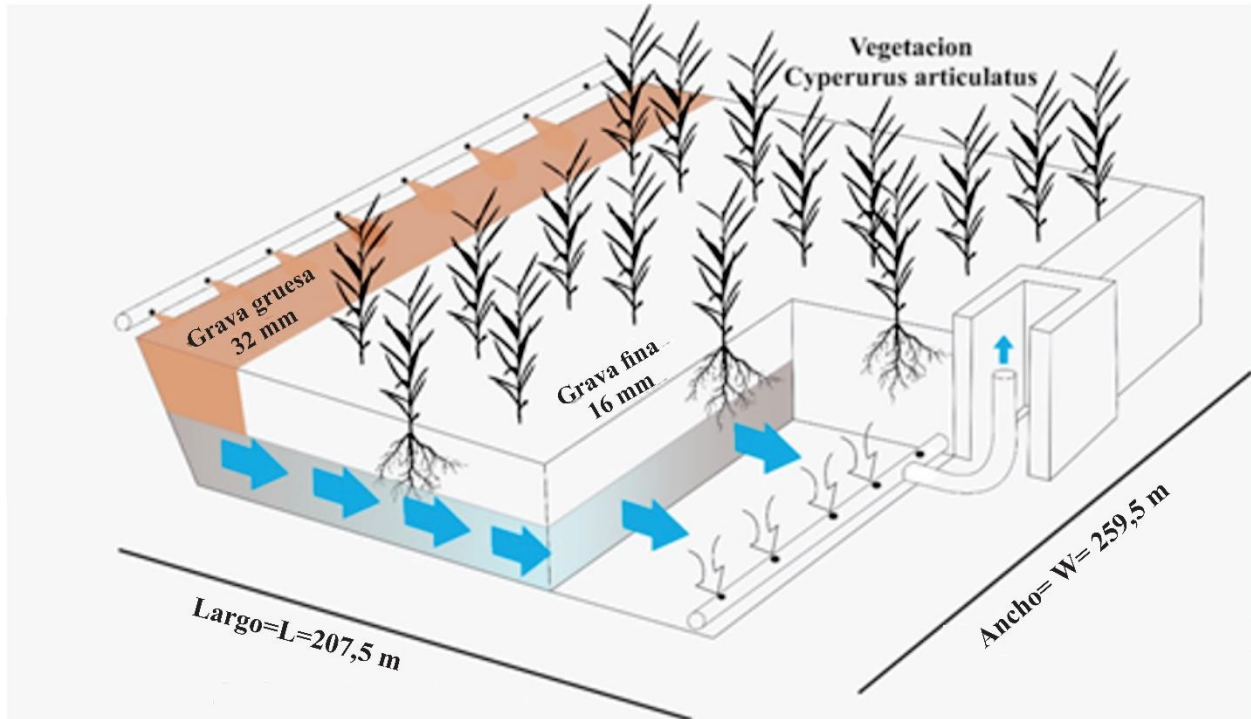


Figura 15. Esquema y diseño del humedal artificial propuesto

5.8 Diagrama de flujo del sistema de tratamiento

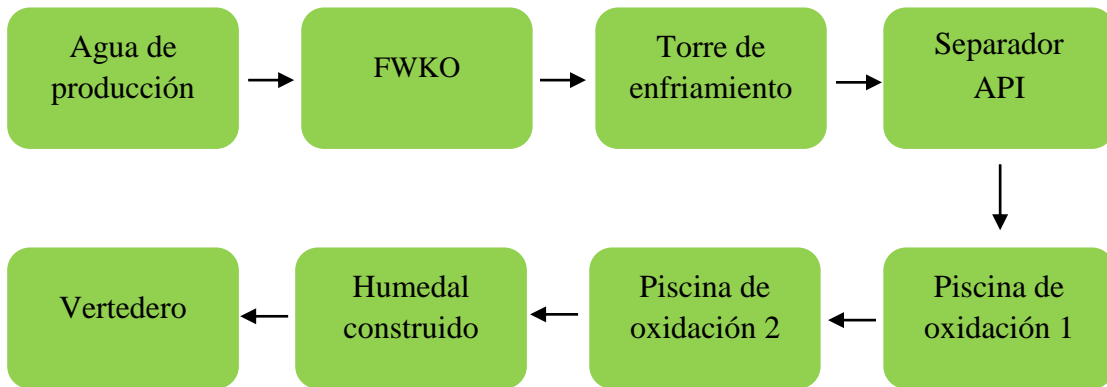


Figura 16. Diagrama de flujo del sistema de tratamiento

La instalación del humedal se prefiere que este ubicada cerca de las piscinas de oxidación y como método de tratamiento anterior a estas. Esta sugerencia se hace debido a que el sistema de tratamiento actual del campo genera una acumulación de trazas de hidrocarburos en la superficie de las piscinas de oxidación, requiriendo personal para retirar de manera manual y constante estas capas que de no ser removidas puede ser vertida a los efluentes de agua Caño Mono y caño Zancudo

5.9 Mantenimiento

5.9.1 Colmatación. Los humedales artificiales son susceptibles a que el lecho filtrante sufra de una obstrucción; a medida que el agua fluye a través del mismo.

Esta obstrucción puede generar una restricción al flujo del afluente, lo que a su vez puede producir inundación del humedal y hacerlo totalmente ineficiente, comprometiendo la calidad del agua a tratar y el sistema de tratamiento de la empresa operadora respecto a las normas de calidad exigidas por el gobierno.

La siguiente figura refleja como a medida que pasa el tiempo se puede formar una colmatación del efluente y la relación que esta tiene con el flujo del agua una vez esto ocurra.

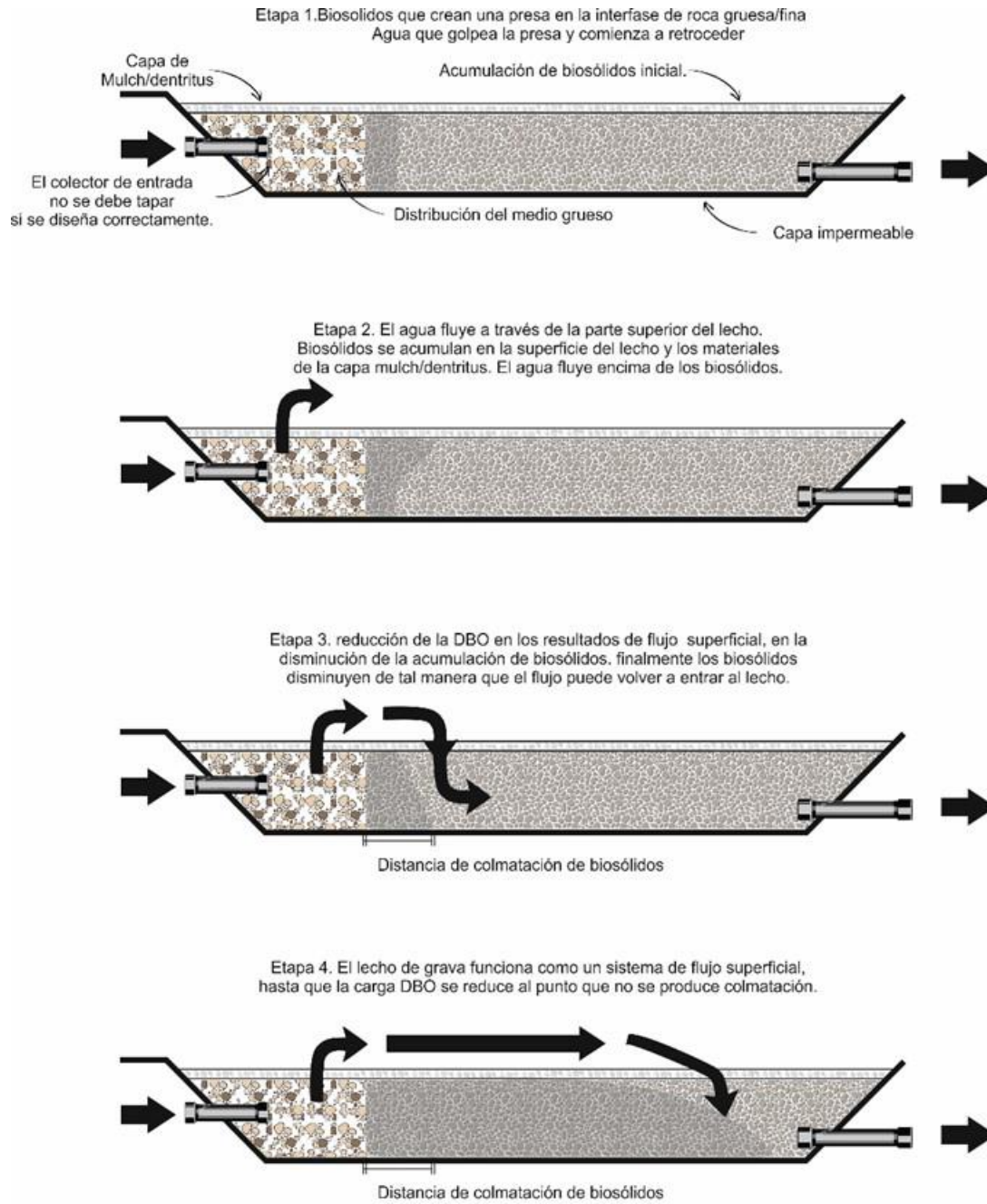


Figura 17. Etapas de colmatación en lechos de humedales de FSSH. Fuente. Modificado de Kadlec and Wallace (2009)

5.10 Monitoreo y eficiencia del humedal construido

Un monitoreo frecuente permite observar la operatividad del sistema. De esta manera, el análisis de muestras a la entrada y a la salida del sistema permite examinar el funcionamiento del humedal construido.

Los parámetros que se deben tener en cuenta en el momento de realizar un monitoreo al humedal son los caudales de entrada y de salida con el fin de verificar las ganancias o pérdidas del flujo causados por evapotranspiración o riego de aguas lluvias.

De esta manera, un monitoreo de los contaminantes es esencial para corroborar la eficiencia propuesta en la construcción del humedal, por tal motivo, un buen estudio supone una toma de muestras mensualmente, sin embargo, se puede realizar cuando se requiera.

6. Evaluación económica del proyecto

6.1 CAPEX

En cuanto a los costos para la inversión inicial de este proyecto, cabe mencionar que hace parte de un estudio económico, en el cual se tiene en cuenta; el aumento de las facilidades de tratamiento de esta agua.

Por tal motivo, los costos iniciales del proyecto se encuentran representados por la disponibilidad del terreno, los estudios de suelos, el diseño del humedal, la excavación de la tierra,

el costo de las membranas, el medio filtrante, las macrófitas instaladas, las estructuras de control, limpieza, además de otros costos de fabricación.

La tabla 29 refleja un resumen de costos para la construcción y funcionamiento del humedal artificial en la planta de tratamiento de aguas del campo Rio Zulia.

Tabla 29.

Costos iniciales estimados para construcción de un humedal artificial en el campo Rio Zulia

Inversión inicial	Costo (USD)
Estudio de suelos	\$ 1.850
Limpieza del sitio	\$ 716
Excavación	\$ 142.207
Recubrimiento con membrana	\$ 128.375
Medio filtrante de grava	\$ 372.550
Vegetación	\$ 542
Sembrado	\$ 717
Estructuras de control	\$ 3.953
Otros costos de construcción	\$ 26.250
Total de inversión	\$ 677.160

Nota. EPA 832-F-00-023. (septiembre de 2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C. Agency Environmental Protection United States

6.2 OPEX

6.2.1 Costo del sistema de tratamiento actual del campo Río Zulia. En la siguiente tabla, se muestran los resultados de la evaluación de las facilidades existentes en las estaciones del Campo Río Zulia.

Tabla 30.

Costo del sistema de tratamiento actual del campo Río Zulia

Estación	Equipo	Costo (USD)
GS1	Separador DRY	200.000
	Separador WET	180.000
GS2	Separador DRY	200.000
	Separador WET	180.000
Estación Principal	Separador segunda etapa GS1	70.000
	Separador segunda etapa GS2	70.000
	Separador tercera etapa	70.000
	Separador de agua libre (FWKO)	90.000
	Scrubber	80.000
	Separador API	140.000
	Accesorios	20.000
Costo total+/-50% [US\$]		1.300.000

En cuanto al costo operacional y de mantenimiento del humedal construido se destaca que son económicos, debido a que las actividades de monitoreo y mantenimiento no requieren grandes suministros de energía.

Por tanto, en este análisis se estiman los costos operacionales de funcionamiento del humedal durante 10 años, es decir, anualmente el precio no superaría los USD \$3.000 por hectárea, sin embargo, de llegar a existir ineficiencia por colmatación, el monto variaría dependiendo al valor del mantenimiento que oscila entre los USD \$4.692,65 por año. De este modo, se tiene un costo anual de mantenimiento por año de USD \$24.627 en un escenario donde se produzca colmatación en el humedal construido.

Tabla 31.

Comparación de costos de un humedal de flujo subsuperficial y un sistema convencional de tratamiento de agua residual

Elemento	Humedal construido	Sistema de tratamiento convencional
Costo de inversión (USD)	\$ 677.160	\$1.300.000
Costo de mantenimiento (USD)	\$24.627	\$62.020,63
Costo total a valor presente (USD)	\$805.999,45	\$2.714.594,64
Costo por cada barril de agua tratada (USD)	\$0,0845	\$0.2087

Nota. EPA 832-F-00-023. (septiembre de 2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. Washington, D.C. Agency Environmental Protection United States

En la tabla 31 se observa como un sistema de tratamiento de aguas residuales a partir de humedales construidos, representan una disminución considerable en los costos de inversión del campo haciendo que estos sean una tecnología económicamente favorable.

Así mismo, el costo por barril tratado es considerablemente económico con una vida útil de 10 años.

Tabla 32.

Áreas requeridas en otros proyectos de humedales artificiales

Nombre localización	Tamaño del humedal (Ha)
Refinería de Mandan	16,6
Refinería de Chevron en Richmond	36,4
Suncor Inc. Alberta, Canadá	0,08
British Petroleum, Puerto everglade, Florida, USA	0,07
Campo Rio Zulia	5,36

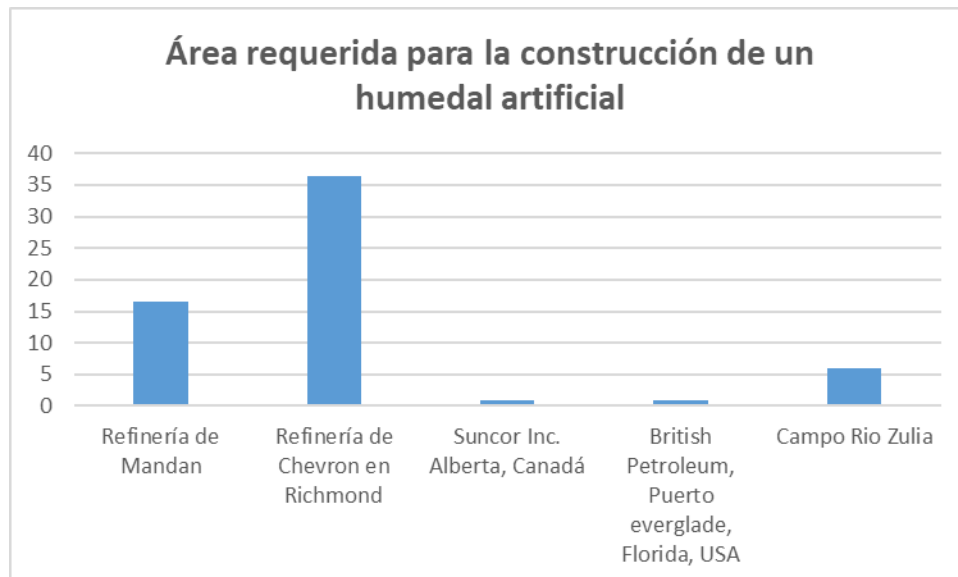


Figura 18. Comparación de tamaños entre humedales construidos y el propuesto en el campo Rio Zulia

Como se puede observar en la tabla 32 y la figura 19; las cuales comparan el área requerida para el proyecto de tratamiento, el tamaño del humedal propuesto para el campo Rio Zulia es comparado con los desarrollados en Alberta Canadá y en puerto everglade Florida, USA. Además,

se puede inferir que hay proyectos que son más grandes que sugieren costos igualmente altos pero que por su eficiencia, resultan económicamente rentables.

6.2.2 Costo de un sistema de tratamiento adicional en el campo Rio Zulia. En un escenario donde no sea aplicado un humedal artificial como método secundario de tratamiento de aguas residuales en este campo, deberá ser necesario instalar un sistema de facilidades adicionales para suplir el tratamiento actual en cuanto al aumento de la producción de agua se refiere. La siguiente tabla muestra los equipos necesarios y los costos actuales para un aumento determinado de agua a tratar.

Tabla 33.

Requerimientos adicionales para el tratamiento de agua residuales del campo Rio Zulia.

Estación	Producción de 54.047 bls de agua	Producción de 86.534 bls de agua	Producción de 122.304 bls de agua
GS1	Un separador trifásico.	Un separador trifásico	Un separador trifásico
	Un manifold de llegada de pozos.	Un separador bifásico.	Un separador bifásico.
	Tubería y accesorios.	Dos manifold de llegada de pozos.	Dos manifold de llegada de pozos.
	Medidores.	Tubería y accesorios.	Tubería y accesorios
GS2			Un separador bifásico.
			Un manifold de llegada de pozos.
			Tubería y accesorios.
			Línea de transferencia de gas.

Tabla 33. *Continuación*

Estación	Producción de 54.047 bls de agua	Producción de 86.534 bls de agua	Producción de 122.304 bls de agua
Estación Principal		Un separador trifásico (2da etapa separación). Un manifold de distribución a separadores.	Dos separadores trifásicos (2da etapa separación). Un manifold de distribución a separadores
Costo de inversión +/- 50% [US\$]	310.000	727.000	1.873.000

Nota. ECOPETROL S.A. (2010). Manual de operaciones de La Estación GS1”, Exploración y producción

7. Conclusiones

1. La construcción del humedal propuesto se evalúa como una alternativa para tratamiento de agua del campo Rio Zulia, ya que según la investigación de ingeniería básica los humedales artificiales son una tecnología que muestra resultados en el tratamiento y control de contaminantes.
2. Debido a que los humedales son excavaciones de tierra afirmada, no se garantiza en modo alguno que no se produzca una contaminación de aguas subterráneas.

3. Antes de la implementación del humedal, se deben evaluar los parámetros de impactos ambientales y sociales, ya que la contaminación no solo puede ser grave por la cantidad de hidrocarburos, sino también por las sustancias tóxicas. Recordando que la carga de contaminante presente es vertida a caño mono.

4. La construcción de un humedal de 5,4 hectáreas en el campo río Zulia, es una alternativa económica y ambientalmente viable, siempre y cuando se garantice el cumplimiento de los parámetros de entrada al humedal y un diseño adecuado que permita un tratamiento eficaz.

5. El área requerida para la construcción del humedal en el campo Río Zulia es muy bajo (5,4 hectáreas) en comparación con los humedales construidos en la refinería de Mandan (16,6 hectáreas) y la refinería de Chevron en Richmond (36,4 hectáreas). Los cuales presentan caudales de tratamiento similares al de este campo.

6. La construcción del humedal muestra una inversión inicial bastante baja (USD \$ 677.160) en comparación con un sistema de tratamiento convencional actual (USD\$1.329.776).

8. Recomendaciones

1. Se recomienda a la Universidad Industrial de Santander continuar el proyecto propuesto en este trabajo mediante la evaluación de si es una alternativa viable social y ambientalmente.

2. Antes de iniciar el proyecto de construcción del humedal artificial; se recomienda iniciar un proyecto piloto que permita observar el comportamiento y análisis de este.

3. La investigación hecha es de ingeniería básica, se recomienda en caso de determinar que es una opción viable, hacer la respectiva ingeniería conceptual.

4. Se recomienda tener en cuenta los estudios realizados al agua de producción ya que tiene que cumplir ciertas condiciones para que el humedal funcione adecuadamente.

Referencias bibliográficas

- Abdi Kabadeh, G. (2014). Wetland engineering to treat process waterer. *Society of Petroleum Engineers - 30th Abu Dhabi International Petroleum*, 3(November), 1858–1870. <https://doi.org/10.2118/171853-ms>
- Amado E. Navarro¹, Yasmín García¹, Antonio Vázquez¹, J. L. M. (2013). Eficiencia de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales del empacado de hortalizas. *Avances En Ciencias e Ingeniería*, 4(2), 39–50.
- Andreo, M. (n.d.). Demanda Biológica de Oxígeno (D.B.O.). Retrieved January 15, 2020, from [https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal//enciclopedia/terminos/DBO.htm?iframe=true& width=95%25&height=95%25](https://www.mendoza.conicet.gov.ar/portal//enciclopedia/terminos/DBO.htm?iframe=true&width=95%25&height=95%25)
- Arias I., C. A., & Brix, H. (2003). Humedales artificiales para el tratamiento de aguas residuales. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 13(1), 17–24. <https://doi.org/10.18359/rcin.1321>
- Borrero, J. Lara, A. (1999). *Depuración de aguas residuales municipales con humedales artificiales*. 122.
- Covarrubias, N., Miura, P., Mayor, J., Urich, J., Guevara, O., Ortega, J., ... Quiñones, R. (1998). Modular road, An access option for wetland environments. *Society of Petroleum Engineers - SPE International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production 1998, HSE 1998*. <https://doi.org/10.2523/46801-ms>
- Cubeña., (2016). Análisis del Desempeño y Operación de Humedales Construidos de Flujo Subsuperficial Vertical para Tratamiento de Agua Residual Doméstica en Países Tropicales. *Researchgate*, (July), 1–108. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4333.2967>

- Cyclus ID. (n.d.). Parámetros fisicoquímicos. Retrieved January 15, 2020, from <http://www.cyclusid.com/tecnologias-aguas-residuales/parametros-aguas-residuales/>
- Environmental Protection Agency. (2000). Wastewater Technology Fact Sheet Wetlands: Subsurface Flow. *Environmental Protection Agency*, 1–7. [https://doi.org/EPA 832-F-99-062](https://doi.org/EPA%20832-F-99-062)
- EPA. (2000). Folleto informativo de tecnología de aguas residuales Humedales de flujo subsuperficial. *United States Environmental Protection Agency, (Us Epa)*, 13.
- Knight, R. L., Kadlec, R. H., & Ohlendorf, H. M. (1999). The use of treatment wetlands for petroleum industry effluents. *Environmental Science and Technology*, 33(7), 973–980. <https://doi.org/10.1021/es980740w>
- Liu, B., Wang, X., Tu, A., Zhang, S., Jiang, Z., & Fu, J. (2016). Cluster wells applied in wetland environment in North Azadegan. *Proceedings of the SPE/IADC Middle East Drilling Technology Conference and Exhibition, 2016-January*. <https://doi.org/10.2118/178191-ms>
- Martínez, P. A. (2005). Evaluación y diseño de un humedal construido para la depuración de aguas residuales domésticas (Vol. 281). Retrieved from <http://nadir.uc3m.es/alejandro/phd/thesisFinal.pdf%5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Universidad+de+murcia#0>
- Mesa, S. L., Orjuela, J. M., Ortega Ramírez, A. T., & Sandoval, J.-A. (2018). Revisión del panorama actual del manejo de agua de producción en la industria petrolera colombiana. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 87–98. <https://doi.org/10.15446/ga.v21n1.69792>
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible, (2015). *Resolución 631 De 2015*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (1984). *Decreto 1594 de 1984*.
- Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible. (n.d.). *Resolución 702 de 27 junio 2018*.

- Moore, B. J., Hardisty, P. E., Thompson, R. G., & Esselinckx, B. (1997). *Fate of hydrocarbon contaminants in wetlands. Annual Technical Meeting 1997, ATM 1997.* <https://doi.org/10.2118/97-41>
- Otálora R., A. (2011). *Evaluación del sistema de tratamiento de aguas residuales domésticas mediante humedales artificiales de alta tasa en la locación petrolera de Caño Gandúl.* 163.
- Peña Varón, M. R., Van Ginneken, M., & Madera P, C. A. (2011). Humedales de Flujo Subsuperficial: Una Alternativa Natural para el Tratamiento de Aguas Residuales Domésticas en Zonas Tropicales. *Ingeniería y Competitividad*, 5(1), 27. <https://doi.org/10.25100/iyc.v5i1.2302>
- Rocha, E. (2010). Ingeniería de Tratamiento y Acondicionamiento de Aguas. *Revista*, Pág 1-22. Retrieved from <http://www.oocities.org/edrochac/sanitaria/carbon6.pdf>
- Sierra Pech, O. M., & López Ocaña, G. (2013). Tratamiento de aguas residuales mediante humedales artificiales. *Revista de Divulgación*, 19, 5306–5306. https://doi.org/10.1007/978-3-319-67199-4_103745
- Sudarsan, J. S., Annadurai, R., Subramani, S., & George, R. B. (2016). Petrochemical wastewater treatment using constructed wetland technique. *Pollution Research*, 35(4), 727–732.
- Torczon, M. (2015). *The use of constructed wetlands to treat aquacultural effluents.* 26, 42–44.
- Vymazal, J. (2007). Removal of nutrients in various types of constructed wetlands. *Science of the Total Environment*, 380(1–3), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.09.014>
- Vymazal, J. (2010). Constructed wetlands for wastewater treatment. *Mdpi*, 2(3), 530–549. <https://doi.org/10.3390/w2030530>

Wallace, S., Schmidt, M., & Larson, E. (2011). Long term hydrocarbon removal using treatment wetlands. *Proceedings - SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 1*, 790–797.

<https://doi.org/10.2118/145797-ms>