

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE DE ANÁLISIS  
MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS DE MANEJO DE  
AGUAS RESIDUALES EN SHALE PLAYS**

**GERSON DARIO BARAJAS SANDOVAL  
ANGIE PAOLA MANRIQUE ORTIZ**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2016**

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE DE ANÁLISIS  
MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS DE MANEJO DE  
AGUAS RESIDUALES EN SHALE PLAYS**

**GERSON DARIO BARAJAS SANDOVAL  
ANGIE PAOLA MANRIQUE ORTIZ**

**Trabajo de grado para optar al título de  
INGENIERO DE PETRÓLEOS**

**Director:**

**EDISON ODILIO GARCÍA NAVAS  
Ingeniero de Petróleos. M.Sc.**

**Codirector:**

**JÓSE MANUEL USURIAGA  
Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERÍA DE PETRÓLEOS  
BUCARAMANGA**

**2016**

## **AGRADECIMIENTOS**

Los autores se permiten expresar sus más sinceros agradecimientos a:

Dios por todas las bendiciones recibidas hasta el día de hoy, por guiar nuestros caminos con amor y sabiduría y por acompañarnos en todo momento para poder culminar con éxito esta etapa de nuestras vidas.

Nuestros padres y hermanos por toda su ayuda constante, amor incondicional y apoyo en momentos críticos.

La Universidad Industrial de Santander, especialmente a la escuela de ingeniería de petróleos y todo su claustro educativo, en la contribución de nuestro crecimiento personal y profesional.

Nuestro director de tesis Edison Odilio García Navas por la confianza depositada en este proyecto, la colaboración, orientación y disposición en todo momento.

José Manuel Usuriaga por sus valiosas sugerencias, el apoyo y colaboración prestada en este proceso.

A la ingeniera Katy Reyes, el ingeniero Oscar Vanegas, la ingeniera Viviana García y demás personas que con su participación, interés y colaboración hicieron esta tesis posible.

*A ti Señor, que, en cada momento de mi vida está presente.*

*A mi familia, por ser mi apoyo y mi voz de aliento.*

*A mis padres por ser el pilar fundamental en todo lo que soy, en toda mi educación tanto académica, como de la vida.*

*A mi compañera de tesis por el apoyo incondicional y felicidad compartida.*

*A todas aquellas personas que me han ayudado a crecer como persona para pensar día a día en mejorar continuamente.*

**Gerson Darío Barajas Sandoval.**

A Dios, por el conocimiento y todas las bendiciones recibidas.

A mi madre Lucila, quién es el motor de mi vida, gracias por el esfuerzo, apoyo incondicional y creer siempre en mí, por ti soy lo que soy, te amo.

A mi hermana María Fernanda, por darme una de mis mayores alegrías y motivaciones: Anthonny.

A mi familia, especialmente a mis tías y mis dos hermosas abuelas por su gran apoyo y amor en todo momento.

A Karent por su compañía, amistad, y ser mi familia por más de tres años.

A mi compañero de tesis, por ser mi amigo, confidente, cómplice y estar siempre que lo necesitaba, gracias por todo el amor brindado.

A mis amigos, compañeros y demás que hicieron esta etapa una de las más memorables, gracias por todas las sonrisas, compañía y experiencias vividas.

**Angie Paola Manrique Ortiz.**

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	17
1. GENERALIDADES DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES .....	18
1.1 SHALE GAS.....	18
1.2 TÉCNICAS PARA LA EXTRACCIÓN DE SHALE GAS .....	21
1.2.1 Perforación Horizontal .....	21
1.2.2 Fracturamiento hidráulico.....	21
1.3 RESIDUOS GENERADOS .....	23
2. AGUAS DE PRODUCCIÓN .....	26
2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN .....	26
2.2 CONTAMINANTES .....	27
2.2.1 Aditivos Químicos .....	28
2.2.2 NORM .....	29
2.2.3 Salinidad en los fluidos de perforación y fracturamiento. ....	29
2.2.4 TSS .....	30
2.3 PROBLEMAS DE LOS CONTAMINANTES.....	31
3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES. ....	33
3.1 TRATAMIENTO DE AGUAS: FACTOR CLAVE EN EL MANEJO DE RESIDUOS. ....	33
3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS. ....	34
3.2.1 Tratamientos primarios. ....	37
3.2.1.1 Filtración. ....	37
3.2.1.2 Procesos Establecidos.....	39
3.2.2 Tratamientos secundarios.....	40
3.2.2.1 Water softening y remoción de hierro .....	40
3.2.2.2 Remoción de orgánicos solubles. ....	42
3.2.3 Tratamientos terciarios.....	43
4. DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES. ....	48
4.1 INYECCIÓN EN POZOS SUBTERRÁNEOS.....	49
4.1.1 Pozos inyectoros.....	50

4.1.2 Inyección en pozos: una práctica conocida para el manejo de residuos en estados unidos.....	51
4.1.3 Normativa en Colombia.....	52
4.1.3.1 Resolución 90341 de 2014. ....	52
4.1.3.2 Resolución 0421 de 2014. ....	53
4.1.4 Factores a considerar. ....	54
4.1.4.1 Factores operacionales.....	54
4.1.4.2 Factores económicos.....	55
4.1.4.3 Factores ambientales.....	56
4.2 REUSO .....	59
4.2.1 Reuso para nuevos fluidos de fractura. ....	60
4.2.2 Panorama en Estados Unidos. ....	61
4.2.2.1 Actualidad en los principales shale.....	62
4.2.3 Normatividad en Colombia.....	66
4.2.4 Factores a considerar. ....	66
4.2.4.1 Factores operacionales.....	66
4.2.4.3 Factores ambientales.....	70
4.3 DESCARGA DE RESIDUOS.....	71
4.3.1 Normativa en Colombia.....	73
4.3.2 Panorama actual en Estados Unidos.....	73
4.4 RECICLAJE .....	74
4.4.1 Reciclaje VS reuso.....	75
4.4.2 Panorama en Estados Unidos .....	76
4.4.3 Reciclaje de aguas colombianas.....	77
4.4.4 Factores a considerar. ....	77
4.4.4.1 Factores operacionales.....	78
4.4.4.2 Factores económicos.....	78
4.4.4.3 Factores ambientales.....	78

5. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA QUE APOYE LA TOMA DECISIÓN EN EL MÉTODO DE DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN YNC.....	79
5.1 ANÁLISIS MULTICRITERIO .....	80
5.1.1 Clasificación de los métodos de análisis multicriterio .....	81
5.1.1.1 Ponderación Lineal (scoring): .....	82
5.1.1.2 Utilidad Multiatributo (MAUT): .....	83
5.1.1.3 Relaciones de Superación: .....	84
5.1.1.4 Proceso Analítico Jerárquico: .....	84
5.2 SELECCIÓN DE CRITERIOS Y SISTEMAS DE PONDERACIÓN.....	85
5.2.1 Criterios y subcriterios de evaluación .....	85
5.2.2 Metodología de selección. ....	89
5.2.2.1 Modulo de adquisición de la información. ....	90
5.2.2.2 Módulo factores ambientales. ....	96
5.2.2.3 Modulo factores operacionales. ....	98
5.2.2.4 Modulo económico.....	103
5.2.2.5 Modulo tratamientos.....	106
5.3 PROGRAMACIÓN DE LA HERRAMIENTA.....	110
5.3.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN .....	110
6. CONCLUSIONES .....	112
7. RECOMENDACIONES.....	114
BIBLIOGRAFÍA.....	116
ANEXOS.....	126

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Participación de las formaciones en los recursos de shale gas .....	20
<b>Figura 2.</b> Variacion de la composición del flowback con el tiempo.....	24
<b>Figura 3.</b> Cadena del agua YNC .....	25
<b>Figura 4.</b> Clasificación de tratamientos .....	44
<b>Figura 5.</b> Opciones manejo de aguas residuales. ....	49
<b>Figura 6.</b> Tendencia manejo de residuos en Marcellus.....	64
<b>Figura 7.</b> Proceso toma de decisiones. ....	81
<b>Figura 8.</b> Módulos de la herramienta.....	89
<b>Figura 9.</b> Información del campo.....	91
<b>Figura 10.</b> Información calidad del agua .....	91
<b>Figura 11.</b> Información de la zona.....	92
<b>Figura 12.</b> Información tratamientos disponibles.....	93
<b>Figura 13.</b> Información tratamiento escogido. ....	93
<b>Figura 14.</b> Preguntas adicionales.....	94
<b>Figura 15.</b> Preguntas métodos de disposición. ....	95
<b>Figura 16.</b> Consideraciones de la herramienta.....	95
<b>Figura 17.</b> Ponderación de los factores ambientales. ....	97
<b>Figura 18.</b> Escenarios costos para la inyección de residuos.....	104
<b>Figura 19.</b> Escenarios costos para el reciclaje del agua residual.....	104
<b>Figura 20.</b> Escenario costo para el reuso del agua residual. ....	104
<b>Figura 21.</b> Normalización de los costos. ....	106

## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Reservas y recursos shale gas.....	20
<b>Tabla 2.</b> Valores referencia composición química del flowback en algunos Shale. .....	28
<b>Tabla 3.</b> Posibles efectos de algunos contaminantes encontrados en las aguas de producción de YNC.....	31
<b>Tabla 4.</b> Tratamientos según varios autores. ....	35
<b>Tabla 5.</b> Agua utilizada para nuevos trabajos de fracturamiento.....	65
<b>Tabla 6.</b> Descarga de residuos en Pensilvania 2012.....	74
<b>Tabla 7.</b> Límites de calidad de agua para reciclaje en Estados Unidos.....	76
<b>Tabla 8.</b> Criterios de la herramienta. ....	85
<b>Tabla 9.</b> Matriz opinión ambiental.....	97
<b>Tabla 10.</b> Consideraciones operacionales.....	99
<b>Tabla 11.</b> Peso de importancia criterios operacionales .....	102
<b>Tabla 12.</b> Tratamientos avanzados. ....	108

## LISTA DE ANEXOS

<b>Anexo A.</b> Recopilación de tratamientos. ....	126
<b>Anexo B.</b> Calidad del agua para reúso. ....	132
<b>Anexo C.</b> Formato encuesta ambiental .....	133
<b>Anexo D.</b> Diagrama de flujo. ....	135

## RESUMEN

**TÍTULO: DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES EN SHALE PLAYS\***

**AUTOR: GERSON DARIO BARAJAS SANDOVAL  
ANGIE PAOLA MANRIQUE ORTIZ\*\***

**PALABRAS CLAVES: YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES, AGUAS DE PRODUCCIÓN, MANEJO DE RESIDUOS, DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES, RECICLAJE, REUSO, INYECCIÓN DE RESIDUOS, ANÁLISIS MULTICRITERIO.**

### DESCRIPCIÓN:

El bajo precio del crudo en la industria de los hidrocarburos obliga a buscar nuevas prácticas que permitan: disminuir de costos, optimizar procesos y mejorar la eficiencia en la explotación de los diferentes tipos de yacimientos (especialmente en yacimientos no convencionales, cuyo desarrollo se ha estancado debido a los altos costos asociados a su operación) sin dejar de lado el desarrollo sostenible de industria de petrolera. En YNC (yacimientos no convencionales) el manejo de aguas residuales es una práctica muy importante que se debe enfocar en cumplir los retos mencionados.

Para elegir el método adecuado de manejo de aguas residuales en YNC se deben considerar varios factores (ambientales, operaciones y económicos), con el fin de encontrar el método más eficiente para cada formación y área geográfica en particular. Gracias a las lecciones aprendidas durante el desarrollo de YNC en Estados Unidos es posible realizar esta evaluación al momento de elegir un método de disposición, evitando consecuencias negativas a largo plazo que se puedan presentar por no considerar factores importantes.

Teniendo en cuenta la importancia de integrar todos los posibles factores a considerar para lograr encontrar el método de disposición más eficiente para cada situación, se hace necesario el desarrollo de una herramienta que ayude al operador a tomar la decisión más eficiente respecto al manejo de aguas en YNC.

---

\* Trabajo de grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería de Petróleos. Director. Ing. Edison Odilio García Navas, Ingeniero de Petróleos.

## ABSTRACT

**TITLE:** DEVELOPMENT OF A MULTI-ANALYSIS SOFTWARE TOOL FOR SELECTION OF METHODS OF WASTEWATER MANAGEMENT IN SHALE PLAYS\*.

**AUTHORS:** GERSON DARIO BARAJAS SANDOVAL  
ANGIE PAOLA MANRIQUE ORTIZ\*\*

**KEYWORDS:** UNCONVENTIONAL RESERVOIRS, PRODUCTION WATER, WASTE MANAGEMENT, WASTEWATER DISPOSAL, RECYCLING, REUSE, WASTE INJECTION, MULTI-CRITERIA ANALYSIS.

### DESCRIPTION:

The low oil price in the hydrocarbon industry forced to seek new practices that allow: reduce costs, optimize processes and improve efficiency in the operation of the different types of plays (especially in unconventional reservoirs, whose development has been stalled because of the high costs associated with their operation) without neglecting the sustainable development of oil industry. In URP (Unconventional Resource Plays) wastewater management is a very important practice which should be focused on meeting these challenges.

To choose the right method of wastewater management in URP, several factors should be considered (environmental, operational and economic factors) in order to find the most efficient method for each particular case. Thanks to lessons learned during the development of URP in United States is possible to make this analysis to choose a method of disposal, avoiding long-term negative consequences that may arise because important factors are not considered.

Given the importance of integrating all possible factors to achieve find the most efficient method available for each well, the development of a tool to help the operator makes the most efficient decisions regarding the management of residual water is necessary.

---

\* Degree project

\*\* Physical and chemical engineering faculty. Petroleum engineering. Director: Ing. Edison Odilio García Navas

## INTRODUCCIÓN

El agua es el residuo más representativo en la industria de los hidrocarburos, especialmente en el desarrollo de yacimientos no convencionales, donde los altos costos de operación y el bajo precio del crudo han estancado las operaciones relacionadas a estos tipos de yacimientos; teniendo en cuenta lo anterior se destaca la importancia de hacer un análisis a las diferentes opciones para la disposición de estos residuos considerando diferentes factores operacionales y económicos con el fin de tomar la decisión más adecuada para cada caso.

Sin embargo, a pesar de que el aspecto económico es el limitante para el desarrollo de estos yacimientos, se hace necesario incorporar factores ambientales debido a que el desarrollo de shale plays ha sido un tema controversial en Colombia y diferentes partes del mundo, por esto, al momento de elegir el método de disposición más adecuado, además de los aspectos económicos y operacionales, se deben considerar reglamentaciones, normas y aspectos ambientales.

Teniendo en cuenta lo mencionado y considerando la importancia para la industria de contar con el mejor método de manejo de aguas residual en yacimientos no convencionales, se hace necesario la creación de una herramienta que apoye la toma de esta decisión, considerando los factores anteriormente mencionados y permitiendo observar cómo estas variables pueden afectar la toma de decisiones.

Este proyecto busca desarrollar una herramienta software que sirva de apoyo a la toma de decisiones para el manejo de aguas residuales basándose en un análisis multicriterio integrando diferentes variables económicas, operacionales y ambientales asociadas al desarrollo de yacimientos no convencionales, considerando que las condiciones de operación y en la zona varían entre un pozo y otro.

## **1. GENERALIDADES DE YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES**

Los yacimientos no convencionales (YNC) son formaciones de roca que contiene hidrocarburo en condiciones geológicas que no permite el movimiento del fluido, ya sea por estar atrapado en rocas poco permeables o por tratarse de crudos de muy alta viscosidad, razón por la cual requiere operaciones especiales para su extracción, diferentes de las prácticas convencionales.

Los YNC tienen tres características comunes: contenido energético bajo con respecto al volumen de la roca, dispersión de yacimientos en áreas muy extensas y permeabilidad muy baja. Su viabilidad económica suele ser incierta debido al bajo contenido de gas o aceite en las rocas fuente, además las prácticas de recuperación del hidrocarburo son más costosas y requieren mayor tecnología, por lo cual deben ser soluciones innovadoras capaces de hacer estos yacimientos económicamente viables<sup>1</sup>. Esencialmente se limitan a tratamientos de estimulación donde la tecnología a escoger dependerá del tipo de hidrocarburo o características de la roca.

### **1.1 SHALE GAS**

El shale gas es gas metano producido por depósitos de lutitas y otras rocas de grano fino. Grandes volúmenes de hidrocarburos pueden quedar almacenados en este tipo de roca, cuya principal característica son los poros muy pequeños con permeabilidad muy baja. El potencial gasífero y petrolífero de una roca de lutita está en función de su volumen (medido en espesor y extensión de área), riqueza orgánica (cantidad y tipo de materia orgánica) y madurez térmica (tiempo de exposición de la roca al calor).

---

<sup>1</sup> ESTRADA, J., Desarrollo del gas lutita (shale gas) y su impacto en el mercado energético de México: reflexiones para Centroamérica. Naciones Unidas. 2013

Debido a la característica del shale de no tener suficiente permeabilidad para que el petróleo y el gas puedan ser extraídos con métodos convencionales, se hace necesario la aplicación de nuevas tecnologías, la cual consiste en la combinación de dos técnicas: Perforación horizontal y fracturamiento hidráulico.

Actualmente se cuentan con recursos recuperables de shale gas en el mundo de 7299 Tera pies cúbicos (TPC), donde los mayores recursos se encuentran en China, el cual cuenta con 1115 TPC, seguido de Argentina con 802 TPC, Argelia con 707 TPC, Estados Unidos con 665 TPC, y Canadá con 573 TPC, mientras que las reservas probadas de gas natural convencional son de 6839 TPC, es decir, como consecuencia de la relevancia que han tomado los recursos de hidrocarburos existentes en yacimientos no convencionales en el mundo, esta alternativa energética ha logrado cambiar el panorama energético mundial, ya que actualmente existe 1.1<sup>2</sup> veces más recursos de shale gas que reservas probadas de gas natural convencional en todo el mundo. Los datos de reservas y recursos de shale gas en el mundo pueden ser observados en la tabla 1.

Suramérica cuenta con importantes recursos de shale, Argentina, en primera instancia, junto con Brasil, Colombia y Chile, son los países de la región que cuentan con un amplio potencial para el desarrollo del shale gas. Los grandes recursos en esta fuente energética, sus infraestructuras gasíferas existentes y la alta participación del gas natural en sus canastas energéticas, son las principales motivaciones para el desarrollo de estos yacimientos.<sup>2</sup>

Se estima que el país tiene un potencial prospectivo de shale gas y shale oil en tres cuencas principales: el Magdalena Medio, Llanos de Colombia, y las cuencas de Maracaibo/Catatumbo. Como se observa en la figura 1, las reservas técnicas

---

<sup>2</sup> PROMIGAS. Informe del sector gas natural 2012 XIV edición. 2012

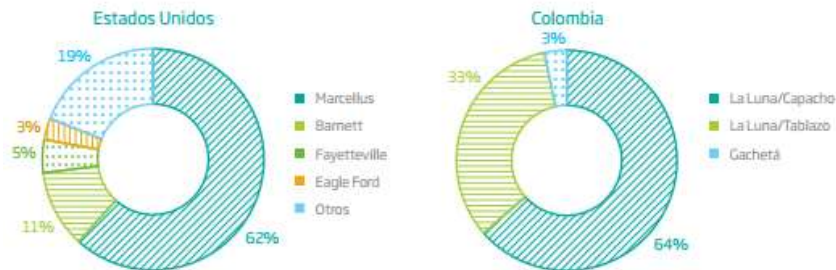
recuperables estimadas son de 6,8 billones de barriles y 55 Terapias de pies cúbicos<sup>3</sup>.

**Tabla 1. Reservas y recursos shale gas**

Países	Reservas probadas de gas natural dic-12	Recursos recuperables de shale gas jun-13	Relación recursos/reservas # veces	Países	Reservas probadas de gas natural dic-12	Recursos recuperables de shale gas jun-13	Relación recursos/reservas # veces
Norteamérica	403	1,783	4	Asia Pacífico	504	1,808	4
Estados Unidos	68	665	10	China	124	1,115	9
Canadá	318	573	2	Pakistán	24	105	4
México	17	545	32	India	44	96	2
Sur y Centroamérica	269	1,430	5	Australia	43	437	10
Argentina	12	802	67	Otros países	269	55	0.2
Brasil	14	245	18	Europa y Eurasia	2,323	885	0.4
Venezuela	195	167	1	Rusia	1,688	287	0.2
Paraguay	0.1	75	750	Polonia	0.15	148	987
Colombia	6	55	10	Francia	0.1	137	1,370
Otros países	42	86	2	Ucrania	39	128	3
Oriente Medio y Norte de África	3,118	1,003	0.3	Otros países	596	185	0.3
Algeria	159	707	4	África Subsahariana	222	390	2
Libia	55	122	2	Suráfrica	0	390	1,300
Egipto	77	100	1	Otros países	222	0	0
Otros países	2,826	74	0.03	Total	6,839	7,299	1.1

Fuente Promigas. 2012.

**Figura 1. Participación de las formaciones en los recursos de shale gas**



Fuente Promigas. 2012

Debido a la gran importancia actual del shale gas en el mercado energético mundial, a la gran cantidad de recursos, y a la viabilidad de Colombia para explotarlos, se hace un recurso indispensable que necesita ser estudiado desde todas las perspectivas, que permitan un desarrollo sostenible de los mismos, siendo el manejo de agua un punto clave para el óptimo desarrollo de YNC.

<sup>3</sup> EIA/ARI World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment. IV. Northern South America. Advance Resource International. 2013

## **1.2 TÉCNICAS PARA LA EXTRACCIÓN DE SHALE GAS**

Para el desarrollo de yacimientos no convencionales, generalmente, es necesario combinar la perforación horizontal y el fracturamiento hidráulico para poder extraer los hidrocarburos, sin embargo, en zonas con grandes espesores es posible recurrir a la perforación vertical.

### **1.2.1 Perforación Horizontal**

Generalmente una operación en YNC comprende de una primera etapa de perforación vertical, seguida de una perforación horizontal, sin embargo, en pozos de gran espesor neto, tal como se espera para el caso colombiano, en etapas iniciales de exploración no sería necesaria la sección horizontal del pozo; ya en las etapas de desarrollo del proyecto se esperaría la sección horizontal en los diferentes pozos.

El revestimiento de acero y el cemento instalados durante la etapa de perforación proporcionan la principal barrera de aislamiento para los lodos de perforación y fluidos de estimulación para prevenir escapes hacia capas más superficiales o hacia los acuíferos. Debido a los problemas ambientales que se le asocian al desarrollo de yacimientos no convencionales, la industria busca evitar estos riesgos aumentando el número de revestimientos y teniendo especial cuidado en la etapa de cementación.<sup>4</sup>

### **1.2.2 Fracturamiento hidráulico**

El fracturamiento hidráulico es un proceso de extracción que es usado tanto para yacimientos convencionales, como para yacimientos no convencionales. En el caso

---

<sup>4</sup> STARK, M., et al. Water and Shale gas development: Leveraging the US experience in new shale developments. Accenture. 2012

de los yacimientos convencionales, el fracturamiento hidráulico no es un requisito indispensable debido a que estos yacimientos cuentan con unas propiedades petrofísicas (porosidad y permeabilidad) que permiten el flujo o movimiento de los fluidos a superficie, sin embargo, el fracturamiento es ampliamente utilizado con el fin de aumentar productividad y resolver diversos problemas de productividad que se presentan en los pozos.

En los yacimientos no convencionales (shale gas/shale oil), la situación es diferente y el proceso de fracturamiento hidráulico es necesario debido a que la propiedad petrofísica de estos dificulta la producción. Con el fracturamiento hidráulico se busca interconectar los pequeños poros de la roca, debido a que la permeabilidad es casi nula, creando una red de fracturas que permiten conectar el yacimiento con el pozo. La práctica ya se ha utilizado un millón de veces en los EE.UU. y representaron hasta 95% de los pozos perforados y 67% de la producción de gas natural en los EE. UU<sup>5</sup>. El proceso a menudo referido como "fracking" consiste en el bombeo de cierto volumen de fluido de fractura ( los pozos verticales de YNC gastan entre 1'050000-1'320000<sup>6</sup> millones de galones de agua, valor de referencia en vaca muerta, y los horizontales en promedio de 3-4 millones de galones, valor de referencia promedio en Estados Unidos, son inyectados por pozo<sup>7</sup>) a cierta presión (entre 500 y 10100 psi, con el fin de generarle ciertas fracturas que permitan la conexión y liberación del gas hacia el pozo.

Para el shale gas, los fluidos de fractura son principalmente agua mezclada con aditivos químicos (slick water) que ayudan a transportar la arena o el agente sostén desde la superficie hasta las fracturas con el fin de apuntalar o mantener abiertas las fracturas luego de que se detiene el bombeo. Una vez que se han creado las

---

<sup>5</sup> MADDEN, B., VOSSOUGH, S. US Shale gas and tight Boom- The opportunities and Risks for America. Society of Petroleum Engineers. 2013.

<sup>6</sup> LOPEZ, E. El abecé de los hidrocarburos en reservorios no convencionales: Shale oil, shale gas, tight gas. Tercera edición. Instituto Argentino del petróleo y gas.2013

<sup>7</sup> PAUGH, L. Marcellus shale water management challenges in Pennsylvania. Society of Petroleum Engineers.2008

fracturas, la inyección cesa y los fluidos comienzan a fluir de vuelta a la superficie, este fluido se conoce como fluido de retorno (en inglés “flowback”).

Actualmente se cuenta con varios tipos de fluido de fracturamiento, sistemas de CO<sub>2</sub>, GLP y sistemas híbridos que buscan reducir los niveles de consumo de agua fresca, además con los avances tecnológicos han permitido utilizar fluidos de fractura que son mezclados utilizando aguas de retorno con altos contenidos de sólidos totales disueltos (TDS). Los fluidos de fractura base agua se espera sigan siendo los más utilizados en la industria petrolera.<sup>8</sup>

### **1.3 RESIDUOS GENERADOS**

En yacimientos no convencionales (YNC) el agua es el principal residuo que se obtiene, los volúmenes que se obtienen varían dependiendo de las características del yacimiento, además puede llegar a superficie, en algunos casos, con grandes concentraciones de contaminantes y altos niveles de hidrocarburo (especialmente para yacimientos de aceite) lo que implica la necesidad de un manejo adecuado de estos residuos. En términos generales se puede decir que son aguas de diferentes composiciones físico-químicas que requieren un análisis particular para cada una de ellas.

El fluido de retorno o flowback está compuesto en parte por los aditivos o productos químicos que fueron utilizados en el fluido de fractura y en algunos casos componentes disueltos de la formación (minerales presentes en la formación shale, así como la salmuera que puede estar presente en los poros de la formación). La mayor parte del fluido de retorno se produce en las semanas siguientes al fracturamiento, típicamente el volumen de fluido de retorno puede representar del 20% al 50% del volumen inyectado inicialmente, en algunos casos los flujos de

---

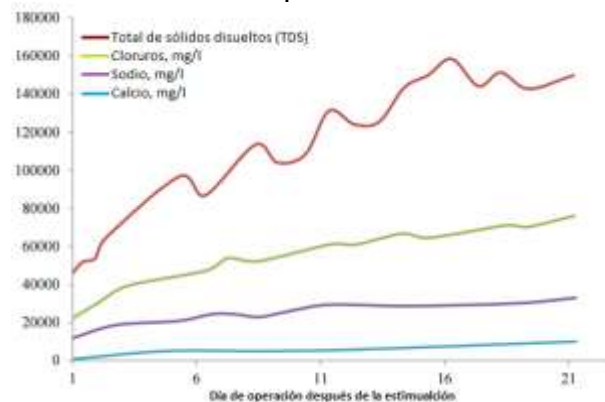
<sup>8</sup> VAZQUEZ O., ET AL. Post-Frac flowback water chemistry matching in a shale development. Society of petroleum engineers. 2014.

retorno pueden prolongarse varios meses después de iniciada la producción del pozo.<sup>9</sup>

La composición del flowback puede variar dependiendo de: la composición del fluido de fractura inyectado, el tiempo de contacto con la formación, la composición química de la formación y el contacto con el agua de formación; normalmente estos fluidos retornan a superficie con altos niveles de TDS (Sólidos disueltos totales), algunos aditivos químicos, concentraciones importantes de algunos tipos de iones y en algunos casos se ha reportado en la literatura la presencia de isótopos radiactivos naturalmente ocurrientes (NORM).

Se debe tener en cuenta que la composición del fluido de fractura utilizado puede variar según cada shale con el fin de satisfacer las necesidades específicas de cada operación. Además a medida que van retornando los fluidos en el tiempo, los últimos en retornar, llegarán a superficie con mayores concentraciones de contaminantes, como puede ser observado en la figura 2. Esto debido a que son aquellos que tienen un mayor contacto con la roca.<sup>10</sup>

**Figura 2.** Variación de la composición del flowback con el tiempo



Fuente: MINGAZETDINOV, I. 2012.

<sup>9</sup> OLAWOYIN, R., WANG, J., OYEWOLE, S. Environmental safety assessment of drilling operations in the Marcellus-Shale gas development. Society of Petroleum Engineers. 2012.

<sup>10</sup> MINGAZETDINOV, I. Predictions of produced water quality and quantity for spatially-distributed wells in Niobrara Formation. Tesis de Maestría. Colorado State University. 2012.

### 1.3 MANEJO DE RESIDUOS

El manejo de aguas residuales debe ser realizado bajo una serie de parámetros que garanticen una disposición segura de los residuos. Los residuos generados en el desarrollo de YNC generalmente tienen como primera etapa un almacenamiento temporal en campo, para ello se requiere el uso de tanques y piscinas (para el panorama colombiano las piscinas no son permitidas). A partir de allí, para el caso de Estados Unidos, los fluidos pueden ser: dispuestos en un pozo inyector, dispuestos en cuerpos de agua, esparcidos en los suelos, tratados en campo, ser llevados a una planta de tratamiento de residuos para un posterior reciclaje o simplemente re-usados para otro trabajo de fracking. Generalmente el escenario de disposición es elegido en base a los costos, la disponibilidad de agua en la zona, la cercanía de pozos de inyección, disponibilidad de tecnología, normatividad, entre otros.

En la figura 3 se pueden observar las 4 opciones principales para la gestión de los residuos en Estados Unidos.

**Figura 3.** Cadena del agua YNC



## 2. AGUAS DE PRODUCCIÓN

El agua es el principal residuo en las operaciones de YNC, los grandes volúmenes (800000 a 2 millones de galones, valor de referencia de Estados Unidos)<sup>11</sup> que se generan y la controversia alrededor de la gestión de los recursos hídricos en la industria del petróleo y gas, hace que se requiera de un especial cuidado en el manejo de este residuo. El agua residual hace referencia al agua de producción la cual se define como la combinación de flowback, salmuera y agua de formación.

Teniendo en cuenta que en algunos pozos no convencionales de U.S el uso del agua puede llegar a los 4,9 millones de galones por pozo<sup>12</sup> y en general un balance de 5-10 Barriles de residuos líquidos por cada 1 millón de pies cúbicos de gas producido o 1 barril de petróleo producido<sup>13</sup>, la gestión adecuada de los recursos hídricos es un factor clave para el desarrollo sostenible de las operaciones, un mal manejo que se haga con estos desechos puede llevar a contaminación de suelos y cuerpos de agua; sin embargo un buen manejo permitirá que el agua residual se convierta en un subproducto y no en un residuo. <sup>14</sup>

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DE LAS AGUAS DE PRODUCCIÓN

La caracterización de las aguas residuales es fundamental para la adecuación de la infraestructura, la definición del tipo de tratamiento requerido y eliminación (disposición) de las mismas, así como para la gestión de la calidad medioambiental. Para la caracterización del agua residual se emplean tanto métodos de análisis cuantitativos, para la determinación precisa de la composición química del agua

---

<sup>11</sup> PAUGH L., Op. cit.

<sup>12</sup> MANTELL M., et al. Produced water reuse and recycling challenges and opportunities across major shale plays. Chesapeake Energy Corporation.

<sup>13</sup> YOXTHEIMER. P. Shale Energy Produced fluids management and UIC well disposal trends. Penn State Marcellus Center for Outreach and research. 2015.

<sup>14</sup> DAHM K., GUERRA K. Produce water reuse case studies. Presentation at EUCI: produced water management in the west conference. 2014

residual, como análisis cualitativos para el conocimiento de las características físicas y biológicas. Los métodos cuantitativos pueden ser gravimétricos, volumétricos o fisicoquímicos.

Este análisis busca conocer la cantidad de sólidos disueltos y bacterias, cantidad de sólidos suspendidos, trazas de hidrocarburo, hierro, pH, alcalinidad, grasas y aceites entre otros parámetros de caracterización general del agua para las aguas de producción.<sup>15</sup>

## **2.2 CONTAMINANTES**

El flowback corresponde al 20-50% del fluido utilizado para el proceso de fracturamiento que retorna a la superficie<sup>16</sup>. Este contiene una amplia variedad de aditivos químicos usados para darle ciertas propiedades al fluido de fractura, además de algunos sólidos disueltos, compuestos orgánicos volátiles (COV), y CH<sub>4</sub>, y puede incluso, en algunos casos según la literatura, contener metales pesados y sustancias radiactivas propias de la roca del yacimiento

Algunos contaminantes típicos y sus niveles presentes en el flowback de algunos shale en Estados Unidos se pueden observar en la tabla 2.<sup>17</sup>

---

<sup>15</sup> HAYES T. Characterization of Marcellus shale and Barnett shale flowback waters and technology development for water reuse. Gas Technology Institute. 2010.

<sup>16</sup> OLAWOYIN, R., WANG, J., OYEWOLE, S., Op. cit.

<sup>17</sup> NYSDEC, New York State department of environmental conservation. Draft SGEIS on the Oil, Gas and Solution Mining Regulatory Program. 2009.

**Tabla 2.** Valores referencia composición química del flowback en algunos Shale.

Sample	#1	#2	#3	#4	#5	#6	#7	#8	#9	#10
Specific Gravity	1.026	1.036	1.019	1.012	1.07	1.1	1.17	1.105	1.066	1.02
pH	7.92	7.51	7.91	6.61	6.72	6.68	6.05	7.11	7.04	6.83
Bicarbonate	1,010	717	1,190	259	183	193	76	366	366	839
Chloride	19,400	29,400	10,000	6,290	59,700	87,700	153,000	96,400	58,300	11,500
Sulfate	34	0	88	67	0	0	0	670	479	0
Calcium	630	1,058	294	476	7,283	10,210	20,100	4,131	2,573	282
Magnesium	199	265	145	49.6	599	840	1690	544	344	40.7
Barium	49.4	94.8	6.42	6.24	278	213	657	1.06	5.1	97.4
Strontium	107	179	44.7	74.3	2,087	2,353	5,049	178	112	45.3
Total Iron	4.73	25.7	8.03	14	27.4	2.89	67.6	26.4	33.8	63.4
Aluminum	0.17	0.21	0.91	0.38	0.18	0	0.1	0.17	0.78	1.12
Silica	33.8		40.7							33.2
Boron	28.2	27.1	26.7	8.82	45.1	73.1	80.4	94.5	65.7	4.79
Potassium	192	273	78.7	85.8	977	1,559	2,273	2,232	1,439	135
Sodium	10,960	16,450	5,985	3,261	26,780	39,990	61,400	54,960	32,600	7,048
TDS	33,300	49,300	18,200	10,800	98,600	144,000	252,000	160,000	97,700	20,200
TSS	57	246	50	30	10	12	32	120	13,762	1,004
TOC	89	64	133	180	218	70	143	266	235	344
				fbw	fbw	pw	pw	pw	fbw	
	Woodford			Marcellus			Bakken		Piceance	St

Fuente: NYSDEC. 2009

### 2.2.1 Aditivos Químicos

Para el fluido de fractura se usan diferentes productos o aditivos químicos, que generalmente corresponden a un 0.49% de la composición del fluido de fractura, algunos catalogados como tóxicos y peligrosos, las más usadas son: reductores de fricción, surfactantes, gelificantes, inhibidores de escamas, ácidos clorhídricos, inhibidores de corrosión, estabilizadores de hierro, KCl, reguladores de pH, entre otros<sup>18</sup>. Sin embargo, vale la pena destacar que el avance de la industria ha permitido desarrollar aditivos no tóxicos. Además, algunos de estos productos químicos pueden ser encontrados en cosméticos, alimentos, detergentes, entre otros.

Estos aditivos químicos cumplen cada uno con una función específica para lograr las especificaciones técnicas requeridas y las concentraciones de cada uno de estos

<sup>18</sup> STARK, M., et al, Op. cit.

aditivos varían dependiendo de las necesidades específicas en cada área o región. Es así como en algunos proyectos se emplean solo algunos pocos aditivos químicos.

### **2.2.2 NORM**

En algunos casos, el flowback puede tener concentraciones de metales pesados e isótopos radiactivos. El término NORM es utilizado para referirse a concentraciones de isótopos radiactivos tales como el uranio, torio, potasio, radio y radón en las rocas. Las actividades en las que se pueden encontrar al menos temporalmente estos materiales radiactivos de bajo nivel son: la minería y la combustión del carbón, producción de shale gas, la minería de metales, fabricación de fertilizantes y en la fabricación de materiales de construcción<sup>19</sup>. Dentro de los hogares modernos se encuentran materiales con NORM o con potencial radiactivo: la acumulación de gas radón en los sótanos, detectores de humo, televisores, vidrio y cerámica.

Los metales radioactivos se concentran principalmente en los shale en comparación con otros tipos de rocas sedimentarias (carbonatos, areniscas, entre otras)<sup>20</sup>. El NORM generalmente se mantiene dentro de los recortes de perforación o en solución con agua producida, pero bajo ciertas condiciones, se puede precipitar a escamas y lodos.

### **2.2.3 Salinidad en los fluidos de perforación y fracturamiento.**

Los fluidos de perforación y fractura deben contener o ser preparados utilizando un fluido base con cierta salinidad para evitar la interacción con la formación y generar un daño de la formación. La salinidad dependerá de las características del yacimiento en particular.

---

<sup>19</sup> DIAZ, S. Riesgos asociados a la radioactividad natural en los proyectos de extracción de gas no convencional. Congreso nacional del medio ambiente. 2014.

<sup>20</sup> GAUCHER, E .Toxic Metals in Shales: Questions and Methods for a Better Management of Flow-Back Waters. Society of petroleum engineers. 2014

La industria del petróleo y el gas a nivel global maneja alrededor de 21 mil millones de barriles (882 mil millones de galones) de agua salada producida por año<sup>21</sup>. Aguas frescas y aguas con aproximadamente la salinidad del agua de mar (35.000 ppm de cloruro de sodio<sup>21</sup>) se pueden tratar con una variedad de tecnologías para producir agua dulce. El costo para producir agua dulce depende del nivel de TDS y el tipo de iones contenidos en el agua. Aguas con salinidades mayores a 35.000 ppm<sup>21</sup>, no se consideran económicamente viable para su tratamiento ya que el aumento del contenido de sal aumenta el costo inicial de tratamiento y costo de la disposición, pero si se consideran viables para su reutilización como base de fluido de fracturamiento. (Un fluido a base agua salada para fracturamiento tiene contenido de 30.000 a 50.000 ppm TDS<sup>21</sup>).

El alto contenido de de TDS en el agua despues de la fractura, está asociado a la disolución de sales presentes en el shale o a la presencia de acuíferos salinos profundos que son contactados durante la fractura. El tratamiento de residuos con altas concentraciones de Cl<sup>-</sup> son muy costosos debido a que este elemento no se elminia con procesos químicos o biológicos convencionales una vez que está en solución.

#### **2.2.4 TSS**

Los TSS (Total de sólidos en suspensión) en grandes cantidades pueden tener ciertos efectos sobre las aguas superficiales: reducir la luz solar disponible, elevar la temperatura, disminuir de oxígeno, y dañar la condición biológica. Los sólidos también pueden obstruir las tuberías y la maquinaria aumentando los costos.

Además de los impactos de la infraestructura, las concentraciones de TSS podrían incrementarse por el tratamiento de residuos de shale plays, aunque la mayoría de

---

<sup>21</sup> VAZQUEZ O., et al, Op. cit.

las plantas de tratamiento de aguas residuales están diseñadas para eliminar los sólidos en suspensión.

### 2.3 PROBLEMAS DE LOS CONTAMINANTES

A continuación, se reúne información de posibles efectos operacionales que podrían causar ciertos contaminantes encontrados en las aguas de producción de YNC.

**Tabla 3.** Posibles efectos de algunos contaminantes encontrados en las aguas de producción de YNC

Contaminante		Posibles problemas operacionales de los contaminantes
NORM <sup>1</sup>	Radio -226/-228	El NORM es un contaminante muy importante ya que puede definir si un agua puede ser tratada para ser reusada o debe ser dispuesta en pozos inyectores debido a que es considerado un residuo peligroso. <sup>5</sup>
	Uranio	
	Radioactividad Alfa	
TDS <sup>1</sup>		Puede causar incompatibilidad de agentes reductores de fricción y un aumento viscosidad fluido. <sup>5</sup>
Cloruros <sup>1</sup>		
TSS <sup>1</sup>		Sobre las aguas superficiales: reducir la luz solar disponible, elevar la temperatura, disminución de oxígeno, y daño en la condición biológica. Los sólidos también pueden obstruir las tuberías y la maquinaria aumentando costos. Además, generar taponamientos <sup>5</sup>
Bario <sup>1</sup>		El bario puede combinarse con sulfatos y generar incrustaciones <sup>5</sup>
Hierro		Altas concentraciones de hierro pueden precipitarse creando emulsiones y taponamientos <sup>5</sup>

Contaminante	Posibles problemas operacionales de los contaminantes
PH	pH levemente fuera del rango ideal puede afectar la compatibilidad de los aditivos químicos y el fluido de fractura. <sup>3</sup>
Metales pesados <sup>5</sup> : calcio, magnesio, bario, estroncio, hierro.	Problemas de depósitos y escamas.

**Fuente:**

<sup>1</sup>EPA. Drinking water contaminants. Recuperado de: <http://water.epa.gov/drink/contaminants/>

<sup>2</sup> TRUQUE, P. Armonización de los estándares de agua potable en las Américas. Recuperado de: <https://www.oas.org/DSD/publications/classifications/Armoniz.EstandaresAguaPotable.pdf>

<sup>3</sup>Educación en el agua de pozo. Recuperado de: [http://region8water.colostate.edu/PDFs/we\\_espanol/Interpretation%202012-3-9-SP.pdf](http://region8water.colostate.edu/PDFs/we_espanol/Interpretation%202012-3-9-SP.pdf)

<sup>4</sup> Agencia para sustancias tóxicas y Registro de enfermedades. Recuperado de: <http://www.atsdr.cdc.gov/>

<sup>5</sup> Slutz J. 2012.

### **3. TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES.**

El tratamiento de las aguas residuales es un factor clave al momento de decidir la mejor opción en el manejo de las aguas residuales. La necesidad de cumplir normativas gubernamentales y buscar diferentes opciones en el manejo de residuos han logrado que el tratamiento de aguas haya ido tomando fuerza en la industria petrolera, los tratamientos pueden estar enfocados en cumplir con los límites legales de vertimiento o la eliminación de TSS con el fin de reusar o reciclar estas aguas.

Constantemente las tecnologías para el tratamiento de aguas avanzan lo que ha permitido tener una mayor gama de opciones teniendo en cuenta los costos y la calidad post-tratamiento de esta agua tratada.<sup>22</sup> Por esta razón se realiza una recopilación de tratamientos usados en la industria de los hidrocarburos basándose en la experiencia adquirida por los operadores de YNC en Estados Unidos, con el fin de hacer una revisión a las posibilidades con las que se cuentan y podrían tener en consideración para un futuro de las operaciones de shale en Colombia.

Es importante tener en cuenta que previo al tratamiento del agua o elección de un método de disposición es esencial la identificación de la calidad del agua ya que la cantidad y calidad puede variar dependiendo del yacimiento o el tiempo que permanece el agua en el pozo.

#### **3.1 TRATAMIENTO DE AGUAS: FACTOR CLAVE EN EL MANEJO DE RESIDUOS.**

El principal objetivo de aplicar un tratamiento o una serie de tratamientos al agua es obtener un fluido de mayor calidad, eliminar contaminantes y cumplir con la

---

<sup>22</sup> VIANA J. Guía para la disposición y tratamiento del agua producida. ARPEL, Asociación regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y el caribe.

normativa o criterios a los que haya lugar. El problema con las aguas residuales en las operaciones de exploración y producción de YNC son los grandes volúmenes para tratar y manejar. Para añadir complejidad, la composición varía con el tiempo y los requisitos pueden variar de un operador a otro y de una región a otra.<sup>23</sup> Por otra parte, la gestión del uso del agua está bajo supervisión del ANLA, esto ayuda a que los métodos de tratamientos y tecnologías sean una opción de constante estudio y desarrollo buscando nuevas tecnologías y soluciones que puedan manejar grandes volúmenes de agua, en la medida se puedan llevar a cabo en equipos móviles para evitar costos de transporte y sean de bajo costo.

El tratamiento de aguas residuales generalmente incluye el cubrir una o varias de las siguientes necesidades:<sup>24</sup>

- Reducción del volumen de iones de cloruro (Reducir la salinidad).
- Eliminación de aceite y grasa.
- Reducción de TDS.
- Disminución de las concentraciones de benceno.
- Disminución de la concentración de la demanda biológica de oxígeno derivada de compuestos orgánicos.
- Control de sólidos en suspensión.

### **3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS TRATAMIENTOS.**

Para el tratamiento de aguas residuales las categorías de los tratamientos se pueden dividir según el tipo de tratamiento aplicado y la finalidad de los mismos. Con el fin de determinar la clasificación adecuada de los tipos de tratamiento en la

---

<sup>23</sup> CRETIU, C., et al. Challenging wastewater treatment. Society of Petroleum Engineers. 2012

<sup>24</sup> GAUDLIP A.W. Marcellus shale water management challenges in Pennsylvania. Society of Petroleum Engineers, Range Resources Appalachia LLC. 2008.

tabla 4 se recopilan las clasificaciones de diferentes autores y compañías dedicadas al tratamiento de aguas en Estados Unidos.

**Tabla 4.** Tratamientos según varios autores.

<b>Autor / Empresa.</b>	<b>Clasificación tratamientos.</b>
<p>Antonio J Mota. Universidad de granada. Recuperado de: <a href="http://www.ugr.es/~mota/Parte2-Tema08.pdf">http://www.ugr.es/~mota/Parte2-Tema08.pdf</a>. Tema de clase.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Tratamiento primario (Mecánico):</b> Eliminar TSS y aceite libre.</li> <li>- <b>Tratamiento secundario (Biológico):</b> Eliminar materia orgánica disuelta y suspendida restante.</li> <li>- <b>Tratamiento terciario (Químico):</b> Reducir TDS y desalación.</li> </ul>
<p>BBC Research  Fracking water treatment: The north Americamarket. 2014</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Tratamiento primario y secundario:</b> Separar aceite y agua, remover aceite hasta 25 ppm. Remover TSS.</li> <li>- <b>Tratamiento terciario:</b> Reducir a 10 ppm Aceite libre y TSS.</li> <li>- <b>Tratamientos avanzados:</b> Desalinización y Zero liquid discharge (ZLD)</li> </ul>
<p>BKT Water energy.  Treatment of produced water for reuse. <a href="http://www.bkt21.com/treatment-of-produced-flowback-water-for-reuse/">http://www.bkt21.com/treatment-of-produced-flowback-water-for-reuse/</a></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Tratamiento primario:</b> Remoción de metales y ablandamiento del agua. (Tratamiento de Mg y Ca principalmente.)</li> </ul>
<p>Ecopreneur.  <a href="http://www.ecopreneur.com.uy/portfolio-view/sistemas-de-tratamiento/">http://www.ecopreneur.com.uy/portfolio-view/sistemas-de-tratamiento/</a></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Tratamiento primario:</b> Reducir TSS y aceite libre (tratamiento mecánico).</li> <li>- <b>Tratamiento secundario:</b> Tratamiento bacterias anaerobias. (Biológico.)</li> <li>- <b>Tratamiento terciario:</b> Filtración y ultrafiltración.</li> </ul>

Autor / Empresa.	Clasificación tratamientos.
<p>Prosep.</p> <p><a href="http://prosep.com/solutions/water/">http://prosep.com/solutions/water/</a></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Tratamiento primario:</b> Desnatador y Reducir TSS.</li> <li>- <b>Tratamiento secundario:</b> Tratamiento con IGF (Flotación por gas inducido.)</li> <li>- <b>Tratamiento terciario:</b> Tratamiento TDS y aceite disuelto.</li> </ul>
<p>S.K Soni</p> <p>Microbes. A source of energy for 21s century.2007</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Tratamiento primario:</b> Reducir TSS y aceite libre.</li> <li>- <b>Tratamiento secundario:</b> Tratamiento biológico.</li> <li>- <b>Tratamiento terciario:</b> Filtración</li> </ul>
<p>Hayes T.</p> <p>Overview of emerging produced water treatment technologies. 2004</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Pre tratamiento:</b> De-oiling (Remover aceite libre).</li> <li>- <b>Tratamiento primario:</b> Remover TSS.</li> <li>- <b>Tratamiento secundario:</b> Remoción de hierro, ablandamiento del agua y tratar orgánicos solubles.</li> <li>- <b>Tratamiento terciario:</b> Desalación y reducción de cloruros.</li> </ul>
<p>Horner P.</p> <p>Shale Gas Water Treatment Value Chain - A Review of Technologies, including Case Studies. Aqua pure ventures and brent halldorson. SPE 147264. 2011</p>	<p>L0: No tratamiento.</p> <p>L1: TSS Básico. &lt;25 mg/l (ppm).</p> <p>L2: TSS Medio. &lt; 5 um.</p> <p>L3: TSS Alto. &lt; 1 um.</p> <p>L4: Remover TSS (100%) y metales.</p> <p>L5: Remover TSS 100%) y TDS</p> <p>L6 Remover TSS, TDS y Desalación.</p>

A partir de la recopilación de las diferentes opiniones el tratamiento de aguas se optó por utilizar la siguiente clasificación para los tratamientos:

- Tratamiento primario (mecánico): Busca eliminar/disminuir cantidad de TSS y aceite libre.
- Tratamiento secundario: Buscar reducir/eliminar TDS (En particular metales pesados, cationes y orgánicos disueltos en el agua) y componentes biológicos.
- Tratamiento terciario: Busca reducir iones de cloruros presentes y altas concentraciones de TDS.

Generalmente una cadena de tratamiento de aguas completa, considera combinar una serie de tratamientos primarios, secundarios y terciarios o avanzados, con el fin de llevar las aguas residuales a los niveles deseados.

### **3.2.1 Tratamientos primarios.**

El tratamiento primario se puede definir como todos aquellos tratamientos que buscan la eliminación de TSS y compuestos que requieren principalmente de procesos mecánicos sin afectar la composición química del agua a tratar.

#### **3.2.1.1 Filtración.<sup>25</sup>**

Un tratamiento previo esencial para casi cualquier etapa de tratamiento incluirá filtración, con esto se busca aplicar un tratamiento primario a las aguas residuales para disminuir la cantidad de TSS, debido a que estos contaminantes tienen el potencial de acumularse en bombas o tuberías provocando problemas operacionales.

---

<sup>25</sup> PIERCE D et al. Water recycling helps with sustainability. Society of Petroleum Engineers. 2010.

El uso de las mejoras químicas para la ultrafiltración, estas etapas de filtración tienen el potencial de reducir los sólidos en suspensión a menos de 10 mg / l y el aceite y la grasa a menos de 2 mg / l reducir notablemente los posibles problemas de ensuciamiento.<sup>26</sup>

La filtración es la eliminación física de partículas por tamaño, La separación puede ser pasivo (por acción de la gravedad), o energía activa (se utiliza para ejercer presión y se forzar el paso de agua limpia a través de un filtro o membrana, dejando atrás los contaminantes). Dependiendo del nivel separación que se logre se pueden clasificar en:

- Filtración de partículas (tamaño de partícula  $\geq 1000 \text{ nm}^{26}$ ) separa por partículas de tamaño que son más grandes que una micra y grasas suspendidas de aproximadamente 10 micras (de diámetro).
- Micro filtración (tamaño de partícula  $\geq 60 \text{ nm}^{26}$ ) se refiere generalmente a la filtración a menos de un nivel micras.
- La ultrafiltración (tamaño de partícula  $\geq 10 \text{ nm}^{26}$ ) es un proceso de separación selectiva utilizando presiones de hasta 145 psi (aproximadamente 10 bar).
- La nanofiltración (tamaño de partícula  $\geq 1 \text{ nm}^{26}$ ) se selecciona cuando ósmosis inversa y ultrafiltración no son la selección correcta para la separación. Las membranas tienen poros de tamaño manométrico. La nanofiltración puede realizar aplicaciones de separación tales como la desmineralización y la desalación, la concentración de solutos orgánicos, sólidos en suspensión, y los iones polivalentes.

---

<sup>26</sup> Ibid.

### 3.2.1.2 Procesos Establecidos.

- Separador API: También llamados separador agua-aceite tiene como principio la diferencia de gravedades específicas de los compuestos a separar, dando como resultado una capa superior de aceite y una capa de sedimentos donde se asientan los sólidos suspendidos y en medio de estas dos el agua separada. Con este método se elimina entre el 50-99% de aceite y solidos con tamaños mayores a 100 micras.<sup>27</sup>
- Filtro de lecho profundo: También conocidos como filtros multimedia. Son una serie de filtros que utilizan medios porosos de filtración para retener partículas. Remueve partículas de tamaño de 5 micras mayores, sin embargo, no se recomienda para aguas con aceite libre mayor a 100 ppm.<sup>28</sup>
- Flotación inducida por gas: La separación por flotación por gas inducido se lleva a cabo al inducir burbujas del gas dentro de una corriente líquida químicamente tratada. Los productos químicos adicionados forman flóculos con los contaminantes que luego, por efecto de las burbujas del gas que se adhieren a los mismos son llevados hasta la superficie en donde son eliminados del sistema mediante barrido mecánico. Este tratamiento logra remover cerca del 90% de aceite y solidos suspendidos.<sup>29</sup>
- Filtro Hidrociclón: Su función es la de separar la arena y otras partículas más pesadas que el agua, por lo que es ideal como filtro previo en las

---

<sup>27</sup> RETEMA, Revista técnica de medio ambiente. Planta de tratamiento de efluentes de la refinería de Cartagena. Edición 167. 2013. Pág 75.

<sup>28</sup> iWATER, <<Filtros de lecho profundo (zeolita o multimedia: arena, grava y antracita)>> [En línea]. Disponible en: <http://www.pds.org.pe/productos/filtros-de-lecho-profundo-zeolita-o-multimedia-arena-grava-y-antracita/>.

<sup>29</sup> JAIMES, D. & PICO, M. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras- Aplicación campo colocado. Universidad Industrial de Santander. Tesis. 2009.

instalaciones. La separación se produce gracias a la velocidad de rotación que se genera al ser inyectada el agua de forma tangencial en el interior del cuerpo del hidrociclón. Su eficiencia de remoción es del 85-95% y partículas mayores a 12-15 micrones.<sup>30</sup>

- Filtración de arena: Las partículas en suspensión que lleva el agua son retenidas durante su paso a través de un lecho filtrante de arena. Se utiliza para aguas con cargas bajas o medianas de contaminantes, que requieran una retención de partículas de hasta 20 micras de tamaño.<sup>31</sup>
- Sedimentación: Consiste en largos tiempos de retención de grandes partículas que se depositan en los tanques, no remueve partículas finas.

Estos métodos se pueden combinar en campo con el fin de lograr un tratamiento de TSS en pozo.

### **3.2.2 Tratamientos secundarios**

En los tratamientos secundarios se busca disminuir la cantidad de TDS presente en el agua sin llegar a ser necesariamente tratamientos que disminuyan los cloruros del agua, es decir, se busca principalmente la remoción de hierro, bajar la dureza al agua (remoción de calcio y magnesio), eliminar orgánicos solubles presentes en el agua y componentes biológicos.

#### **3.2.2.1 Water softening y remoción de hierro**

Al hablar de water softening (ablandamiento del agua) se hace referencia a la

---

<sup>30</sup> PROSEP. Hydrocyclones. 2014

<sup>31</sup> SEDILTRA, <<Filtros de arena y carbón activo>> [En línea]. Disponible en: <http://www.sefiltra.com/filtros-de-arena.php>.

remoción de magnesio, calcio y algunos cationes metales presentes en el agua, la remoción de estos componentes y la remoción de hierro se realiza con el fin de obtener un agua con menor cantidad de iones, generalmente el incremento de la aplicación de estos tratamientos es mayor en áreas donde se busca reutilizar el agua, sin embargo si la opción es el reciclaje o el vertimiento se deben cumplir con ciertos niveles establecidos.<sup>32</sup>

Los procedimientos más comunes para la remoción de estos componentes son:

- Aireación y sedimentación: Se utiliza principalmente para la remoción de hierro. Es el método estándar para la remoción de hierro en la mayoría de estados en Estados Unidos. El pH debe ser ajustado a mayor de 7.5 con el fin de un mejor rendimiento<sup>32</sup> y tiene una eficiencia del 70-80%.<sup>33</sup>
- Ablandamiento Lime Soda Ash: La precipitación química es uno de los métodos más comunes utilizados para ablandar el agua, los dos químicos normalmente usados son hidróxido de calcio (lime) y carbonato de sodio (soda ash), al añadir estos químicos los minerales (Mg y Ca) reaccionan formando precipitados insolubles que luego serán removidos.<sup>34</sup>
- Intercambio Iónico: El intercambio iónico es un intercambio de iones entre dos electrolitos o entre un electrolito solución y un complejo. En la mayoría de los casos el término se utiliza para denotar los procesos de purificación, separación, y la descontaminación de las soluciones acuosas. Este proceso

---

<sup>32</sup> HAYES T. Overview of emerging produced water treatment technologies. Gas Technology Institute. 2004.

<sup>33</sup> AISSA W. Preliminary design and cost estimation of waste water treatment unit. Mechanical Power Department, High Institute of Energy, Aswan, Egypt. 2008.

<sup>34</sup> <<Lime soda ash softening>> [En línea]. Disponible en: [http://water.me.vccs.edu/exam\\_prep/limesodaash.htm](http://water.me.vccs.edu/exam_prep/limesodaash.htm).

puede remover casi todo el calcio y magnesio presente en el agua y hasta 5-10 ppm de hierro y manganeso.<sup>35</sup>

### **3.2.2.2 Remoción de orgánicos solubles.**

En el tratamiento primario se busca remover aquellos orgánicos que se encuentran libres (aceite libre), pero aquellos que se encuentran solubles requieren mayor tecnología para ser removidos, estos a su vez pueden ser divididos en compuestos disociables a su forma iónica o compuestos que no son disociables. Un requerimiento importante para el vertimiento de aguas es la reducción de la demanda biológica de oxígeno del agua y esto se logra removiendo los compuestos orgánicos presentes.<sup>36</sup> Para lograr esto los procesos más utilizados son:

- **Carbón activado:** Los filtros de carbón activo se utilizan principalmente para eliminación de cloro y compuestos orgánicos en el agua. La eficiencia de remoción de orgánicos es alta, por ejemplo, la remoción de BTEX (Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno).<sup>36</sup>
- **Ozonación:** Los sistemas de ozonación a escala industrial han sido usados para tratar aguas residuales con el principal objetivo de eliminar compuestos orgánicos resistentes al tratamiento biológico<sup>37</sup>. La efectividad de la desinfección es directamente proporcional a la Concentración del Ozono (C) y al tiempo de contacto (t).<sup>38</sup> La eficiencia de remoción de orgánicos varía entre el 90-99%<sup>39</sup>. Además, la ozonación ayuda a la eliminación de aceite

---

<sup>35</sup> SHARON, O., DVORAK, V. Drinking water treatment: Water softening (Iron exchange). University of Nebraska. 2014.

<sup>36</sup> Hayes, T, 2004, Op.cit.

<sup>37</sup> MADRIMASD, <<Tratamiento del agua residual industrial de una papelera mediante ozonación>> [En línea]. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2011/03/08/131573>.

<sup>38</sup> Ozonización del agua. Disponible en: [http://www.living-water.org/ozonacion\\_del\\_agua.html](http://www.living-water.org/ozonacion_del_agua.html)

<sup>39</sup> ABSI, F et al. Pilot plant investigation of ozone disinfection of physicochemically treated municipal wastewater. McGill University.

libre y una remoción de hierro logrando hasta 5 ppm de hierro, sulfuros y manganeso.<sup>40</sup>

- Tratamientos biológicos: Los procesos biológicos tienen la capacidad de degradar aceite disuelto, ácidos volátiles y otros orgánicos solubles, tiene como principio el uso de bacterias aerobias para remover hasta 90% de desechos biodegradables orgánicos y hasta un 98% de BETEX.<sup>41</sup>
- Radiación UV: La radiación ultravioleta (UV) de oxidación es un proceso de destrucción que oxida los contaminantes orgánicos en el agua. La eficiencia de este proceso es mayor condiciones acidas (pH 5)<sup>42</sup>, sin embargo, la eficiencia a condiciones de pH normales (6-7) es cerca del 90%.<sup>43</sup>

### **3.2.3 Tratamientos terciarios.**

En los tratamientos terciarios encontramos aquellos procesos avanzados que buscan eliminar altas concentraciones de TDS especialmente eliminar las altas concentraciones de cloruros.

En la literatura existe un gran número de tecnologías para el tratamiento de aguas de flowback, las cuales pueden clasificarse de varias formas, encontrando que la clasificación más común está asociada a cómo funciona o bajo qué principio trabaja el tratamiento. Para este tipo de clasificación hay tres grupos importantes tal como se muestra en la siguiente ilustración.

---

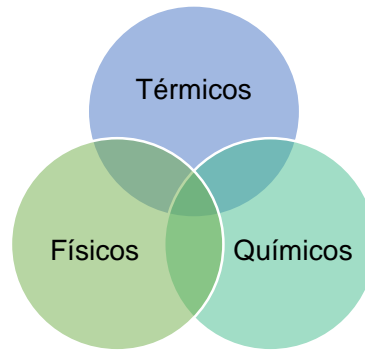
<sup>40</sup> NATHANSON, R, et al. The Practical Use of Ozone for the Well Water Application. Ozone Pure Water Inc. 2012.

<sup>41</sup> <<Tratamiento biológico de aguas residuales y desechos orgánicos>> [En línea]. Disponible en: <https://aguasresiduales.wordpress.com/2008/05/30/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales>.

<sup>42</sup> WANG, G., et al. Catalyzed UV oxidation of organic pollutants in biologically treated wastewater effluents. Department of Public Health, National Taiwan University, Taipei. NCBI. 2001.

<sup>43</sup> KIRANKUMAR, V, et al. The applicability of UV/Oxidation technologies to treat contaminated groundwater. American Institute of Chemical Engineers. 1993

**Figura 4.**Clasificación de tratamientos



Los tratamientos físicos hacen referencia a la remoción física de partículas ya sea de forma activa o pasiva, generalmente se asocia a la separación por membranas.

- Nanofiltración: La nanofiltración se puede considerar tratamiento terciario ya que además de eliminar sólidos suspendidos, también puede tratar orgánicos y eliminación de sales con una eficiencia cercana al 98%. Permitiendo una recuperación cercana al 75% del residuo para ser reutilizado.<sup>44</sup>
- Osmosis Inversa (OI): La ósmosis inversa utiliza alta presión (600-900 psig) con el fin de forzar una salmuera a pasar a través de una membrana que retiene sales en un lado y permite que el agua desmineralizada fluya del otro. En condiciones ideales la OI debe ser capaz de tratar salmueras de hasta 65.000 mg/l de TDS<sup>45</sup>, para las aguas de producción de la industria de los hidrocarburos su eficiencia puede estar marcada en una eliminación de hasta el 99%<sup>46</sup>, es necesario un tratamiento previo de aceites libres y disueltos con el fin de que no se obstruya la permeabilidad de la membrana. La tecnología

---

<sup>44</sup> <<Technical Note.Nanofiltration Treatment of MIEX® Process Waste>> [En línea]. Disponible en: [http://www.miexresin.com/files/pdfs/TechNote\\_Waste\\_Treatment-NF\\_V0508.pdf](http://www.miexresin.com/files/pdfs/TechNote_Waste_Treatment-NF_V0508.pdf).

<sup>45</sup> DALE, A, et al, Op. cit.

<sup>46</sup> ALL CONSULTING, <<All Consulting.com>> [En línea]. Disponible: <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ReverseOsmosisFactSheet.pdf>. [Último acceso: 07 10 16]

en los últimos años ha buscado aumentar el rango de efectividad para el uso de la OI.<sup>47</sup>

- **Electrodiálisis:** Se utiliza para transportar iones de sal desde una solución a otra a través de membranas de intercambio iónico por medio de diferencia de potencial eléctrico aplicado. Los procesos de electrodiálisis son únicos en comparación con la destilación y otros procesos basados en membrana (como la osmosis inversa) en que las especies disueltas son movidas desde la corriente de alimentación y no al revés; debido a que la cantidad de especies disueltas en la corriente de alimentación es mucho menor que la del fluido. La electrodiálisis ofrece la ventaja de recuperación de alimentación mucho más alto que las técnicas de filtración regulares. Permite una recuperación de agua entre 80-90%.<sup>48</sup> Su eficiencia es mayor para aguas con TDS<8000<sup>49</sup>.

Los tratamientos térmicos hacen referencia al uso de energía para calentar el agua residual, con el fin de evaporarla y luego condensarla para remover contaminantes, como es el caso de la evaporación, destilación y cristalización.

- **Evaporación térmica/condensación:** El primer paso es el calentamiento de la salmuera a en una cámara de evaporación, luego con el uso de un compresor se comprime el vapor de agua para recuperar el agua. Esta opción puede utilizarse para aguas de hasta 250.000 mg/l de TDS.<sup>50</sup>

---

<sup>47</sup> GAUDLIP, A. Op. cit.

<sup>48</sup> DALE, A, et al. Water Recycling helps with sustainability. Brandt NOV Global. Society of Petroleum Engineers. 2010.

<sup>49</sup> RPSEA. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. Technical assessment of produced water treatment technologies. Primera Edición. Escuela de Minas de Colorado. 2009

<sup>50</sup> Water & Waste water International, <<Water lessons from the US to Europe>> [En línea]. Disponible en: <http://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-27/issue-2/regional-spotlight-europe/shale-gas-fracking.html>.

- **Cristalización:** Las altas concentraciones de TDS en el efluente pueden ser tratadas por destilación y cristalización; el agua residual es evaporada de sus constituyentes disueltos.<sup>51</sup> En aplicación de los YNC el proceso, cuando se combina con la evaporación y condensación térmica tiene como objeto la recuperación de agua dulce y una masa de sal de las aguas de producción y de las aguas de retorno. Un desafío para la aplicación de la cristalización está representado por los grandes tamaños de equipos necesarios para el manejo de los flujos y el manejo de la sal residual como residuo sólido. La eficiencia es similar a la de la evaporación/condensación, pero a diferencia de la anterior esta opción no contempla desechos líquidos, por lo que se le conoce a este tipo de sistemas como ZLD (Zero Liquid Discharge).<sup>52</sup>
- **Destilación térmica:** La destilación difiere de todas las demás formas de purificación del agua; en que, a través de ésta, se remueve el agua de las impurezas en vez de remover las impurezas del agua. El agua es sometida a cambios de fases durante el proceso, pasando de estado líquido a gaseoso y volviendo nuevamente a su estado líquido. El cambio del estado líquido al gaseoso, es el que conlleva la separación del agua de sus impurezas. Todo aquello que tenga un punto de ebullición mayor que el del agua (100°C), permanecerá en un estado líquido, mientras que el agua y todo aquello con un punto de ebullición igual o menor, será convertido en vapor. Cuando este vapor es condensado, lo único que queda son hidrógenos, oxígenos y unas pocas de sustancias que hierven a menores temperaturas que el agua.<sup>53</sup> El problema son los altos consumos energéticos que requiere la destilación, con

---

<sup>51</sup> DORAN, G., & LEONG, L. Developing a Cost Effective Solution for Produced Water and Creating a 'New' Water Resource. United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory DOE/MT/95008-4. 2000.

<sup>52</sup> GAUDLIP, A. Op. cit.

<sup>53</sup> HUMBOLDT de México, <<¿Qué es destilación?>> [En línea]. Disponible en: <http://www.humboldtdeMexico.com/datos/webs/glosario/destilac.htm>.

el fin de recuperar la mayor cantidad de agua se apoya del uso de compresores de vapor. La eficiencia de eliminación alcanza el 98%.<sup>54</sup>

- **Recompresión mecánica de vapor:** Los procesos de re compresión mecánica del vapor (MVR por sus siglas en inglés), son procesos térmicos industriales ya estandarizados con alta eficiencia de destilación. Generalmente se usan como procesos para la desalinización del agua y recuperación de aguas residuales. El proceso de destilación de agua es similar al de la evaporación térmica, a diferencia de que para este proceso se utilizan compresores mecánicos para incrementar la presión del vapor. Son procesos que se han podido adaptar a plantas móviles con capacidades de tratamiento de hasta 2500 barriles por día. El tratamiento MVR se destaca por la alta capacidad de tratamiento, llegando a tratar aguas residuales de hasta 200.000 TDS, con recuperaciones de agua entre el 70 y 80%.<sup>55</sup>

Las tecnologías de tratamientos químicos generalmente están asociadas a tratamientos secundarios, tales como el intercambio iónico, oxidación, electrocoagulación, radiación, entre otros.

En el anexo 1 se puede ver la recopilación de tratamientos utilizados en la industria y para algunos se relaciona el costo estimado por barril del tratamiento (datos de Estados Unidos). Los tratamientos se ordenan de acuerdo al nivel (primario, secundario y terciario), en la tabla se puede observar que en la mayoría de los casos a medida que se sube el nivel del tratamiento los costos asociados aumentan, el rendimiento o carga de salida varía de acuerdo al pre-tratamiento, condición inicial del agua tratada y equipos utilizados.

---

<sup>54</sup> Hayes T. 2004, Op. cit.

<sup>55</sup> ALL CONSULTING, <<All Consulting.com>> [En línea]. Disponible: <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ThermalDisillationFactSheett.pdf>. [Último acceso: 07 10 16]

#### 4. DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES.

Para el análisis de la viabilidad o aplicabilidad de un método de disposición se deben considerar factores ambientales, económicos y operacionales involucrados en el mismo. Generalmente el primer criterio a considerar son los aspectos económicos, ya que de estos depende la viabilidad del proyecto. Sin embargo, debido a la regulación actual y percepción social, los criterios ambientales actualmente han tomado gran relevancia.<sup>56</sup>

Teniendo en cuenta la experiencia adquirida por parte de los operadores en Estados Unidos, se destaca la importancia de hacer un seguimiento al agua desde su fuente hasta su punto de disposición, buscando cuantificar correctamente los volúmenes de agua dispuesta, posibles errores en las operaciones, entre otros, sin embargo actualmente no se realiza en todos los shales en Estados Unidos un seguimiento al ciclo del agua de los cuerpos de agua que se utilizan para las diferentes operaciones, además tampoco se realiza un seguimiento adecuado luego del punto de disposición, hecho que preocupa a la comunidad en este país, si se tiene en cuenta que el agua asociada al fracking es considerada por reguladores como contaminante si no se realiza la gestión adecuada.<sup>57</sup>

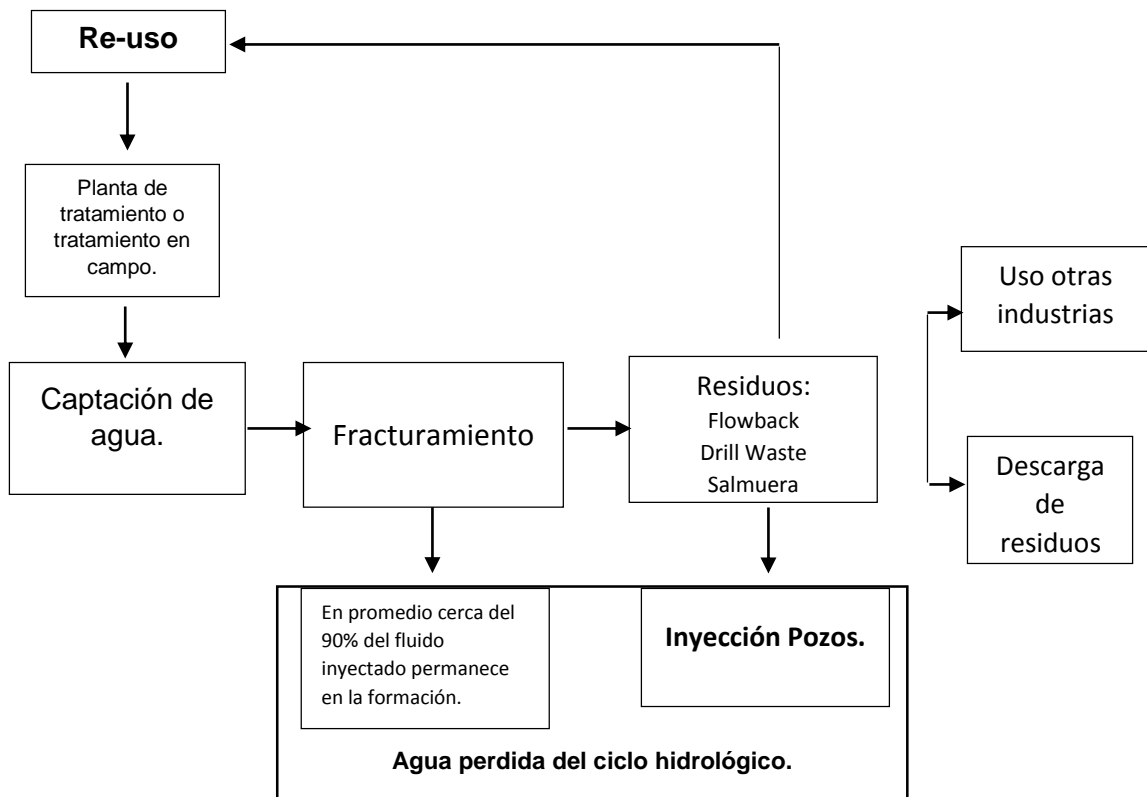
---

<sup>56</sup> TAYLOR, T. Demonstrating social responsibility in water management decisions. Golder Associates. URTeC:1922591. 2014.

<sup>57</sup> OLSON D, et al. Smart water management as part of supply chain logistics for source rock. IBM. Society of Petroleum Engineers. 2013.

Para el Análisis de las diferentes opciones del manejo de aguas residuales se parte de la experiencia adquirida por parte de los operadores en Estados Unidos, teniendo en cuenta que es el país con mayor experiencia en el desarrollo de YNC, teniendo en cuenta el panorama colombiano. En la figura 4 se pueden observar las diferentes opciones para el manejo de agua en YNC y el agua perdida en del ciclo del agua para un pozo de Shale.

**Figura 5.** Opciones manejo de aguas residuales.



**Fuente:** Hansen, E., et al. 2013

#### 4.1 INYECCIÓN EN POZOS SUBTERRÁNEOS.

La disposición de aguas y residuos en general a través de inyección es una opción eficaz y ampliamente reconocida. La inyección de residuos hace referencia al

bombeo de residuos desde superficie través de un pozo hacia formaciones del subsuelo para su disposición.<sup>58</sup> Generalmente se usa para aguas residuales de baja calidad, sin embargo, la capacidad de los pozos de inyección es limitada y para utilizar los pozos de inyección como opción de disposición será necesario perforar un gran número de pozos destinados para este fin. Además, se debe asegurar que la formación geológica donde se vaya a realizar la operación cuente con las condiciones de inyectividad apropiadas para la confinación de estas aguas residuales: que cuente con un sello natural impermeable, que no permita la migración de fluidos hacia otras formaciones geológicas, acuíferos o a cuerpos de agua superficiales y que cumpla con los requisitos establecidos por la normativa actual.

#### **4.1.1 Pozos inyectoros**

Los pozos de inyección están diseñados para proporcionar el transporte de líquidos en depósitos subterráneos de una manera que no afecten negativamente al medio ambiente, por lo que deben estar geológicamente y mecánicamente aislados de fuentes de agua fresca<sup>57</sup>. Un típico pozo de inyección consiste en tuberías concéntricas, que se extienden varios miles de pies hacia abajo desde el nivel de la superficie hacia zonas de inyección permeables y altamente salinas que están confinadas en forma vertical por medio de estratos impermeables. La tubería de revestimiento o casing, se extiende por debajo de la base de las fuentes subterráneas de agua potable y se cementa hacia la superficie para evitar la contaminación de dichas fuentes subterráneas.<sup>59</sup> En Colombia estos pozos que permiten inyectar fluidos a un yacimiento deben ser expresamente autorizados por el ministerio de minas y energía (Resolución 181495 de 2009).

---

<sup>58</sup> RAMNATH, K., DYAN, S. Implementing waste management strategies. Petroltrin. Society of Petroleum Engineers. 2001.

<sup>59</sup> EPA US Environmental Protection Agency, <<General Information about Injection Wells>> [En línea]. Disponible en: [http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/basicinformation.cfm#what\\_is](http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/basicinformation.cfm#what_is).

#### **4.1.2 Inyección en pozos: una práctica conocida para el manejo de residuos en estados unidos.**

Durante la década anterior la inyección de residuos en pozos subterráneos era la opción de disposición más utilizada en Estados Unidos, convirtiéndose en la opción más popular entre los operadores, debido a esto se puede considerar que es una de las opciones con mayor experiencia. La experiencia adquirida con el paso de los años puede ayudar a evitar problemas que se presenten por el uso de este método de disposición, sin embargo actualmente algunas investigaciones buscan evidenciar los problemas ambientales asociados a esta operación; actualmente los estudios de las alternativas de disposición de residuos se llevan a cabo por las compañías operadoras y la industria en conjunto, con el fin de buscar la mejor alternativa a la inyección de residuos, estos esfuerzos se ven reflejados en los cambios a la tendencia de los métodos de disposición por parte de las compañías operadoras.<sup>60</sup>

El auge del desarrollo de YNC durante el último lustro (2010-2015), ha aumentado los volúmenes de desechos producidos y si se tiene en cuenta que la infraestructura actual para la disposición de residuos por medio de la inyección de pozos no ha aumentado a ese mismo ritmo, el constante crecimiento de la industria y las operaciones actuales excederán la capacidad de las facilidades disponibles actualmente para la disposición, esto podría representar un gran problema para los operadores si se tiene en cuenta que a pesar de ser posible una reducción en los volúmenes a eliminar.<sup>61</sup>

El shale Marcellus es uno de los que evidencia estos problemas de escases de pozos de inyección de la zona, por esto la mayoría de desechos que se disponen

---

<sup>60</sup> OWLEN, L., et al. Marcellus Shale water management challenges in Pennsylvania. Range Resources Corp. Society of Petroleum Engineers. 2008.

<sup>61</sup> OWLEN, L., et al. Op. cit.

por medio de esta operación son transportados hacia pozos inyectores en Ohio, debido a esto en Marcellus recientemente se ha optado por reutilizar la mayor cantidad de flowback posible y utilizarlo como base para la preparación o mezcla del nuevo fluido de fractura. Para este shale los volúmenes de flowback promedio son 24 mil barriles de fluido de retorno por pozo.<sup>62</sup>

#### **4.1.3 Normativa en Colombia.**

A diferencia de Estados Unidos, Colombia, actualmente, no cuenta con una política de hidrocarburos no convencionales que regule la disposición de residuos por medio de inyección en pozos subterráneos. Sin embargo, con el fin de empezar a formular esta política el ministerio de minas y energía ha trabajado bajo el marco de cooperación institucional con el ministerio de ambiente para definir diferentes términos de referencia que deben seguir los operadores para cada una de las áreas involucradas en la operación. Además, se han realizado consultorías internacionales bajo el convenio 089 de la ANH y el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible, en donde unas de las áreas en mención fueron la sismicidad inducida y los fluidos de retorno, temas muy relevantes al hablar de inyección de residuos.<sup>63</sup>

##### **4.1.3.1 Resolución 90341 de 2014.**

Teniendo en cuenta el decreto 3004 del 26 de diciembre de 2013, el ministerio de minas y energía establece en la resolución 90341 de 2014 una serie de requerimientos técnicos y procedimientos para la exploración y explotación de hidrocarburos en yacimientos no convencionales que incluye, entre otras, las

---

<sup>62</sup> STARK, M., et al. Water and shale gas development leveraging the US experience in new shale developments. Accenture consulting. 2012.

<sup>63</sup> SARMIENTO, L. Hidrocarburos no convencionales: Viabilidad y pertinencia operativa. Naturgas. 2015.

normas técnicas y procedimientos en materia de integridad de pozos, inyección de agua de producción y fluidos de retorno.

En el artículo 15 describe los requerimientos para pozos inyectores de fluido de retorno y agua de producción en donde se incluyen y describen los requerimientos de información geológica de la formación de interés para realizar la operación, los requerimientos de construcción para el pozo, las pruebas iniciales de integridad mecánica del pozo, límites de la operación, monitoreo y adicionalmente los requerimientos para convertir pozos existentes a pozos inyectores.

Adicionalmente el ministerio de minas describe en el artículo 16 una serie de casos en los cuales se debe suspender las actividades de inyección y las actividades a seguir en caso de que se suspenda la operación.

#### **4.1.3.2 Resolución 0421 de 2014.**

El ministerio de ambiente y desarrollo sostenible define en la resolución 0421 de 2014 una serie de términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental para proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos en la cual se encuentra en el anexo 3 de la norma, una serie de términos de referencia complementarios para el desarrollo de yacimientos no convencionales.

En términos generales la inyección de residuos debe realizarse en una formación geológica que cuente con las condiciones de inyectividad apropiadas, como se mencionó anteriormente y en caso de que esta contenga agua, deberá tener condiciones que no permitan realizar un uso actual de la misma de acuerdo a los criterios de calidad establecidos por la norma.

Para la perforación de un nuevo pozo para la reinyección de residuos, el estudio de impacto ambiental (EIA) del solicitante deberá diligenciar y seguir una serie de

indicaciones de las cuales se destacan, la información de los caudales del agua a inyectar, información de la formación donde se realizará la inyección, monitoreos de agua a realizar alrededor del pozo inyector, compatibilidad de los fluidos a inyectar, informes de cumplimiento ambiental y muestreo de los fluidos a inyectar. Si por el contrario se planean utilizar pozos de reinyección existentes se deberá suministrar la información requerida por el ministerio con el fin de evaluar las condiciones de los pozos existentes.

#### **4.1.4 Factores a considerar.**

En este trabajo se realizará una descripción cualitativa de los criterios a considerar en el manejo de residuos mediante inyección subterránea.

##### **4.1.4.1 Factores operacionales.**

Algunos factores deben ser monitoreados de cerca, más allá de los factores técnicos que se involucran en la operación de inyección de residuos, también se deben considerar los factores técnicos relacionados con el agua. El manejo y logística de la disponibilidad del agua para futuras operaciones requiere de decisiones que involucren toda la cadena logística del agua.<sup>64</sup>

En primer lugar, para la disposición de residuos vía inyección subterránea se requiere la aprobación del EIA por parte del ANLA donde se especifiquen los volúmenes autorizados a disponer. Además, en algunos casos los operadores buscan almacenar la mayor cantidad de residuos con el fin de realizar el menor número de viajes de disposición y tramitar la menor cantidad de permisos. Sin embargo, en Colombia no se podrá almacenar fluidos de retorno o agua de

---

<sup>64</sup> OLSON, D., et al. Op. cit.

producción en piscinas al aire libre, únicamente en frac tanks u otros similares, factores que se deben considerar al momento de evaluar esta opción.<sup>65</sup>

El principal factor operacional relacionado directamente con la técnica es la capacidad de disposición de los pozos inyectores y el cumplimiento de los requerimientos técnicos por parte de la ANH para la perforación de nuevos pozos de inyección. Esto sumado a los requerimientos geológicos, ambientales y costos de perforar una mayor cantidad de pozos para inyección, ya que se debe tener en cuenta las limitaciones por parte del ministerio de ambiente con el fin de preservar los cuerpos de agua.

#### **4.1.4.2 Factores económicos.**

Los factores económicos serán determinantes en la viabilidad del proyecto; para el manejo de aguas residuales la adquisición de agua fresca y logística de disposición de flowback en los shale puede ser un problema. El desarrollo de YNC requiere estrategias en el manejo del agua que tengan en cuenta la capacidad de adquisición de agua en la zona para evitar sobrecostos de transporte y precio de la misma. Los costos asociados al manejo del agua son: adquisición, transporte y disposición.

En los costos de disposición el factor fundamental es la distancia del sitio de operación a las facilidades de disposición, un mayor número de kilómetros recorridos aumentará los costos de disposición<sup>66</sup>

- **Costos**

**Transporte:** El transporte en la mayoría de campos puede llegar a ser el costo

---

<sup>65</sup> Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. ANLA. Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos. 2014.

<sup>66</sup> TAYLOR, T. Op. cit.

asociado más alto, es requerido para mover el agua fresca al pozo y mover residuos hacia el sitio de disposición. El costo de transporte es de 0.02 USD/bbl/km<sup>67</sup> (valor referencia de Estados Unidos), dependiendo de la distancia de transporte. No se hace consideración especial sobre un método de disposición en particular.

**Adquisición de agua:** El agua utilizada para las operaciones de fracking puede ser comprada o tomada de fuentes de agua fresca, el costo 0.25 USD/bbl<sup>67</sup> (valor referencia de EUA), varía de acuerdo a la disponibilidad de agua en la zona.

**Disposición:** El costo de disposición varía de acuerdo al método escogido, para el caso de la inyección de pozos, el costo promedio es de 1 USD/bbl<sup>67</sup> (valor referencia de Estados Unidos).

#### **4.1.4.3 Factores ambientales.**

Los aspectos ambientales asociados a cada metodología de disposición afectaran directamente la percepción social sobre la operación que se realiza en la zona, por esto debe buscar realizar las operaciones con el menor impacto ambiental posible.<sup>66</sup> Los aspectos ambientales asociados a la inyección de residuos se basaron principalmente en la resolución 0431 de 2014 y el anexo 3 de la norma, que hace referencia al desarrollo de yacimientos no convencionales.

- **Demanda de agua.**

El agua usada por la industria se tiene tanto de fuentes públicas como privadas, su ciclo en la industria es extracción, utilización y devolución al medio ambiente en algunos casos. Este recurso atrae la atención de la comunidad, entidades

---

<sup>67</sup> SLUTZ, J., et al. Key Shale Gas Water Management Strategies: An Economic Assessment. Society of Petroleum Engineers. 2012.

gubernamentales y reguladores por lo que el agua usada en el fracturamiento hidráulico a menudo es noticia con connotación negativa.<sup>68</sup>

El agua necesaria para el fracturamiento hidráulico proviene de acuíferos, aguas superficiales o agua proveniente del reúso del flowback de operaciones anteriores de fracking. En algunas áreas, el fracking puede llegar a constituir una parte significativa de la demanda total de agua, sin embargo, se requieren estudios de impacto ambiental acertados para minimizar el posible riesgo de afectar una comunidad o entrar a competir con otros sectores por el agua en la región.

En Estados Unidos, a pesar de tener un gran desarrollo y gran número de pozos de fracking los volúmenes de agua utilizados para los pozos no convencionales no superan el 2% de la demanda de agua en las diferentes zonas en promedio<sup>69</sup>. Las extracciones de agua para fracking pueden dañar las vías fluviales locales y aumentan los costos para las actividades agrícolas y municipales. También pueden aumentar la inversión pública en infraestructura de agua.

- **Microsismicidad inducida.**

Debido a la inyección de los fluidos es posible afectar la actividad sísmica de la zona provocando perturbaciones que desencadenen liberación de energía de fallas geológicamente activas; por esto es necesario un análisis de riesgo que contemple el potencial de causar sismicidad desencadenada de acuerdo a la resolución 0421 de 2014.<sup>70</sup>

En Estados Unidos se le ha asociado al fracking un aumento en la actividad sísmica en diferentes zonas donde se desarrolla la actividad. Un reporte reciente realizado por la NRC (National Research Council) identificó 8 casos en los cuales eventos

---

<sup>68</sup> OLSON, D., et al. Op. cit.

<sup>69</sup> MONROE, S., et al. Water worth waiting for: Smart water management reduces environmental impact. Baker Hughes. Society of Petroleum Engineers. 2014

<sup>70</sup> Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Op. Cit.

micro sísmicos tenían relación con la disposición de residuos en pozos inyectoros en Ohio. Ohio se ha convertido en un punto de disposición con gran afluencia para la disposición de residuos, más de 500 millones de galones de residuos de fracking fueron dispuestos en pozos subterráneos en 2011<sup>71</sup>. Más recientemente, algunos estudios documentan sismos en Oklahoma, Arkansas, Ohio, Texas y Colorado asociados con esta práctica de disposición (Van der Elst et al.2013).

- **Transporte de residuos.**

El tráfico de camiones es uno de los mayores impactos a las comunidades cercanas a la explotación de shale gas ya que el alto nivel de tráfico provoca daños a la infraestructura vial (a menudo no está diseñado para transporte pesado) existente, altos niveles de congestión vial, y levantamiento de polvo que puede afectar la salud, por lo que el transporte de fluidos por camiones pesados es una de las mayores preocupaciones de las comunidades locales<sup>72</sup>. Reducir el número de camiones asociado con el transporte de fluidos o desechos asociados a la explotación de YNC es la forma más eficaz de reducir el riesgo de accidentes y la liberación de flowback u otros fluidos en el medio ambiente.

- **Ciclo hidrológico del agua**

Cerca de 20-50% del fluido utilizado para el proceso de fracturamiento retorna a superficie <sup>73</sup>, es decir, entre un 80-50% del agua usada para fracturamiento hidráulico permanece en el subsuelo, además si el agua que regresa a superficie

---

<sup>71</sup> DUTZIK, T., RIDLINGTON, E. The costs of fracking: The price tag of dirty drilling's environmental damage. Frontier Group. 2012

<sup>72</sup> HORNER, P., et al. Shale gas water treatment value chain- A review of technologies, including case studies. Society of Petroleum Engineers. 2011.

<sup>73</sup> OLAWOYIN, R. Op. cit.

se dispone por medio de inyección en pozos profundos, se elimina por completo del ciclo del agua<sup>74</sup>.

## **4.2 REUSO**

El reúso hace referencia a la reutilización del agua para un nuevo proceso de fractura u otras actividades relacionadas con la industria de los hidrocarburos, en la mayoría de casos será necesario aplicar tratamientos a las aguas residuales que variara dependiendo de las opciones de tratamiento disponibles, calidad de agua, cantidad de agua a tratar y parámetros mínimos para el uso que se le vaya a dar, para efectos de este trabajo solo se considerará usar el agua para nuevos fluidos de fractura, sin embargo se debe tener en cuenta que el agua podría ser utilizada para método de recobro o alguna otra operación cumpliendo con los requerimientos de calidad para el desarrollo de dicha actividad. Los altos costos asociados a los tratamientos avanzados suponen una de las mayores limitaciones a esta opción de disposición.

En la actualidad la reutilización es una de las alternativas que va ganando peso en los principales Shale de Estados Unidos y los avances tecnológicos en los tratamientos aplicados a las aguas residuales sumado a un aumento en la concientización ambiental por parte de la industria ha aumentado los porcentajes de agua destinados a reúso, estos volúmenes pueden ser enviados a plantas de tratamiento, tratados en campo o simplemente mezclados con agua fresca; la cantidad de agua a tratar y el nivel de tratamiento será determinante en esta decisión.

En los últimos 5 años la reutilización de aguas residuales en operaciones de YNC se ha incrementado con el paso de los años en Estados Unidos, inicialmente se

---

<sup>74</sup> HANSEN, E et al. Water Resource Reporting and Water Footprint from Marcellus Shale Development in West Virginia and Pennsylvania. Earthworks Oil & Gas Accountability Project, 2013.

empezó a utilizar esta práctica como alternativa a la falta de disponibilidad de pozos inyectoros en algunas zonas y al aumento de la normativa para la disposición de estas aguas. Actualmente ha dejado de ser una alternativa para convertirse en la primera opción de manejo de residuos<sup>75</sup>; los beneficios en la conservación del agua, la disminución de costos y el cumplimiento de las políticas ambientales han facilitado su uso <sup>76</sup> y gracias a estos beneficios, esta opción puede ser clave en el futuro desarrollo de los YNC en Colombia, tal como está sucediendo en US, ayudando a superar los retos de la demanda de agua y regulaciones impuestos por la normativa.

El flowback puede ser almacenado y reutilizado en un sistema cerrado, sin embargo, en la mayoría de casos será necesario introducir en este sistema agua fresca debido a que los volúmenes que retornan a superficie por pozo solamente logran un porcentaje de la demanda de agua para un nuevo trabajo de fracturamiento. Por esto cuando consideramos la reutilización como opción al manejo de aguas las dos características principales que deben ser examinadas son los porcentajes de agua recuperada y la calidad de la misma <sup>77</sup>; de este último aspecto la principal característica que destaca es la alta salinidad, medida en TDS, cuyos niveles pueden variar entre un Shale y el otro, dependiendo de la matriz de la roca y la geología de la formación; estos niveles de TDS han sido la principal restricción o reto para el reúso y reciclaje de estas aguas. <sup>78</sup>

#### **4.2.1 Reúso para nuevos fluidos de fractura.**

---

<sup>75</sup> GE Power and Water. Flowback & Produced water treatment overview. General Electric Company. 2012

<sup>76</sup> TINKER, S. Oil & Gas water use in Texas: Update to the 2011 mining water use report. University of Texas. 2012.

<sup>77</sup> SETH, K., et al. Maximizing flowback reuse and reducing freshwater demand: Case Studies from the challenging Marcellus Shale. Society of Petroleum Engineers. 2013.

<sup>78</sup> NATIONAL PETROLEUM COUNCIL. Management of Produced Water From Oil and Gas Wells. 2011.

Al hablar de reúso se debe hablar de tratamiento, si se tiene en cuenta los altos niveles de contaminantes que generalmente tienen las aguas de retorno en YNC, el reciclaje de aguas para nuevos fluidos de fractura es posible gracias a los avances tecnológicos de los cuales dispone la industria, donde el principal avance ha sido la reducción de los costos de estos tratamientos y la posibilidad de crear nuevos fluidos de fractura sin requerimientos técnicos tan altos, esta reducción de los costos ha sido fundamental porque los operadores tienden a elegir la opción más económica y sostenible<sup>79</sup>. Los tratamientos son utilizados para disminuir niveles de TSS (Sólidos totales suspendidos), metales, aceites y en algunos casos TDS (Sólidos disueltos).<sup>80</sup>

Para lograr un rendimiento óptimo a altas concentraciones de TDS es necesario evaluar los fluidos de fractura para evitar incompatibilidades con la formación.<sup>81</sup>

#### **4.2.2 Panorama en Estados Unidos.**

Actualmente ya se posee la tecnología para tratar las aguas logrando que sea tecnológicamente posible el reúso de estas aguas para futuras operaciones, los tratamientos más utilizados son: Osmosis Inversa, ultrafiltración, electrocoagulación, evaporación térmica y cristalización.<sup>82</sup> Estas tecnologías logran recuperar entre un 60 y 96% del agua.

A pesar de tener la tecnología disponible se ha mencionado que el método de disposición de preferencia en la mayoría de yacimientos en US es la inyección de residuos y si se tiene en cuenta, la disponibilidad de pozos de inyección en Barnett, Haynesville y Fayetteville explica por qué los volúmenes de agua reutilizada en

---

<sup>79</sup> STARK, M. Op. cit.

<sup>80</sup> GAUDLIP, A. Op. cit.

<sup>81</sup> PAKTINAT, J., et al. Case Studies: Impact of high salt tolerant friction reducers on fresh water conservation in Canadian shale fracturing treatments Society of Petroleum Engineers. 2011

<sup>82</sup>HUSSAIN, A., et al. Advanced technologies for produced water treatment. Conoco Philips. OTC 24749. 2014.

estos Shale es baja si se compara con Marcellus.<sup>79</sup> Sin embargo la tendencia actual de los operadores en la mayoría de Shales es aumentar los porcentajes de agua reutilizada, ya sea como reúso o reciclaje.<sup>83</sup>

*Eureka Resources* y *Chesapeake Energy* son un ejemplo de compañías (de servicio y operadoras) que han establecido como meta alcanzar un 100% de agua reciclada para el desarrollo de sus actividades. Eureka por ejemplo ofrece a sus clientes un modelo de tratamiento de aguas que incluye, pretratamiento, cristalización, tratamiento biológico, intercambio iónico, unidades de osmosis inversa y actualmente ha optimizado un tratamiento térmico con el fin de lograr estos objetivos y ayudar a las compañías operadoras a lograrlo igualmente.

#### **4.2.2.1 Actualidad en los principales shale.**

A continuación, se presenta una recopilación del panorama actual de algunos de los principales shale en Estados Unidos para tener como referencia que en algunos de ellos la tendencia al manejo de aguas ha ido cambiando con el paso de los años.

- **Barnett.**

En Barnett, generalmente se inyectan los residuos en la formación Ellenberg. Hacia el 2011 se reciclaban aproximadamente 230 mil galones por pozo en la zona sur del play, la reutilización representa un 6% del agua utilizada para el fracking en un nuevo pozo, la logística y los costos son sus principales limitantes. Cheakespeare es pionera en usar tecnologías de evaporación para los residuos en Barnett, la unidad que se utiliza es la INTEVRAS evaporate unit.<sup>84</sup>

- **Marcellus.**

---

<sup>83</sup>MCMANUS, K., et al. A sustainable choice for water treatment/recycling when injection is not an option or water supply is limited. Eureka Resources. Society of Petroleum Engineers. 2015.

<sup>84</sup> MANTELL, M. Op. cit.

Actualmente se recicla/reúsa cerca del 100% del agua inicial producida, los procesos de filtrado y de cristalización han sido exitosos en este play, los fluidos remanentes (en particular las aguas de producción tardías) son enviados a pozos inyectoros, una muy baja cantidad de residuos son enviados a plantas de tratamiento avanzado. El agua reutilizada representa el 10% del agua para un nuevo fluido de fractura.

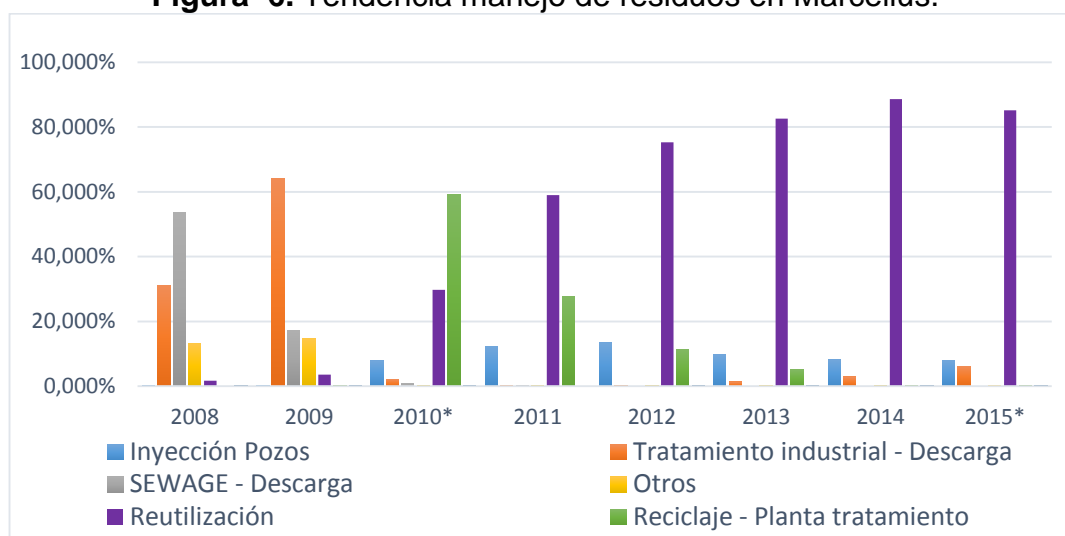
La poca cantidad de pozos inyectoros en Marcellus incentivó a la reutilización de sus aguas, debido a que las pobres características geológicas de la zona para perforar pozos en formaciones que aceptarán fluidos para su disposición.<sup>85</sup>

Para el Shale Marcellus fue posible acceder a la base de datos de reportes de operador en Pensilvania (disponible en la web del departamento de medio ambiente de Pensilvania), allí se pudo recopilar y clasificar la información de disposición de residuos en este estado para este shale en el periodo enero 2008 – junio 2015 (para el periodo enero 2010-junio 2010, no se logró consolidar la información). Con el fin de observar de una manera más clara el cambio en el manejo de residuos líquidos (salmuera, agua de formación y flowback) que se ha presentado en este shale durante el periodo mencionado, se recopiló la información en la figura 5, donde se puede observar que para el primer año de análisis la opción de disposición más utilizada fue la descarga en cuerpos de agua por medio de plantas industriales o plantas municipales, en los siguientes años se incrementó el porcentaje de volúmenes dispuestos por medio de pozos de inyección y así mismo se incrementó la reutilización de residuos, inicialmente por medio de plantas de tratamiento, opción que fue disminuyendo su uso con el paso de los años. Ya en los últimos 3 años la tendencia ha sido la reutilización de estos residuos líquidos.

---

<sup>85</sup> SETH, K., et al. Op. cit.

**Figura 6. Tendencia manejo de residuos en Marcellus.**



**Fuente:** <<Reportes de operador en PA>>. [En línea]. Disponible en: <https://www.paoilandgasreporting.state.pa.us/publicreports/Modules/DataExports/DataExports.aspx>. [Último acceso: 05/05/16]

- **Eagle Ford Shale.**

Actualmente los operadores de este Shale han empezado a aumentar los porcentajes de reciclaje/reutilización del agua residual, en algunos casos alcanzando el 30% de agua reutilizada, un panorama muy diferente al de hace 5 años cuando este porcentaje solo llegaba al 1%, de hecho el rápido crecimiento del reciclaje en la región de Eagle Ford ha sido estimulado por la nueva normativa adoptada por la comisión de Texas en esta zona y se estima que la adopción de nuevas reglas para disminuir la demanda de agua para operaciones de fracking aumentará aún más los porcentajes de reutilización en la zona.<sup>86</sup> Para el reciclaje de las aguas y el tratamiento de aguas generalmente se utilizan tratamientos en campo.<sup>87</sup>

- **Permian Basin.**

<sup>86</sup> SCOTT, J. Eagle Ford water recycling thrives following change in Texas Railroad Commission rules. Baker & Hostetler LLP Houston. UOGR Digital Magazine. 2014.

<sup>87</sup> [www.wateronline.com/doc/purestream-operations-treat-eagle-water-gonzalez-countytexas-0001](http://www.wateronline.com/doc/purestream-operations-treat-eagle-water-gonzalez-countytexas-0001).

Un porcentaje significativo (>30%) del agua es reutilizada en esta región gracias a la relativa baja salinidad del agua en algunas zonas de este Shale. Para nuevos fluidos de fractura en esta región los operadores generalmente utilizan agua residual de yacimientos convencionales para disminuir los porcentajes de agua fresca utilizados. <sup>88</sup>

En la tabla 5 se pueden observar porcentajes estimados de agua utilizada para nuevos trabajos de fracturamiento en algunos Shale, allí se puede observar el porcentaje que representa el agua reutilizada (año 2011) en estas zonas.

**Tabla 5.** Agua utilizada para nuevos trabajos de fracturamiento.

Shale	Tipo	2011	Comentarios.
Permian	Reciclaje/reuso	1% <sup>1</sup>	Se reutiliza >30% del agua producida. <sup>1</sup>
	Salmueras	55% <sup>1</sup>	
	Agua fresca	44% <sup>1</sup>	
Barnett	Reciclaje/reuso	5% <sup>1</sup>	Se reciclan cerca de 230 mil galones por pozo. <sup>2</sup>
	Salmueras	3% <sup>1</sup>	
	Agua fresca	92% <sup>1</sup>	
Eagle Ford.	Reciclaje/reuso	0% <sup>1</sup>	Actualmente (año 2015) el panorama ha cambiado y en algunos pozos se recicla cerca del 30% del flowback producido. <sup>3</sup>
	Salmueras	20% <sup>1</sup>	
	Agua fresca	80% <sup>1</sup>	
Fayetteville	Reciclaje/Reuso	6% <sup>2</sup>	Se reciclan cerca de 250 mil galones por pozo <sup>2</sup>
	Agua fresca/salmuera	94% <sup>2</sup>	
Marcellus	Reciclaje/Reuso	10% <sup>2</sup>	Se recicla cerca del 100% del agua inicial producida. <sup>2</sup>
	Agua fresca salmuera	90% <sup>2</sup>	

**Fuente:**

1. Tinker S. 2011

2. Mantell M. 2011

3. Artículo web. <http://www.ogj.com/articles/uogr/print/volume-2/issue-4/eagle-ford-water-recycling-thrives-following-change-in-texas-railroad-commission-rules.html>

<sup>88</sup> TINKER , S. Op. cit.

### **4.2.3 Normatividad en Colombia.**

En Colombia actualmente no se tiene una política que fomente el reuso o reciclaje de las aguas de producción o fluidos de retorno de YNC, principalmente por los altos niveles de contaminantes a los que generalmente se les asocia a estos fluidos residuales. La única referencia que se tiene es en la resolución 04212 de 2014 donde se menciona que con base al EIA se debe incluir la reutilización del agua para la estimulación hidráulica en el apartado de uso de aguas como estrategia para mitigar los impactos asociados con el uso de agua por parte de la industria.

### **4.2.4 Factores a considerar.**

En este trabajo se realizará una descripción cualitativa de los criterios a considerar en el manejo de residuos en el proceso de reuso de estas aguas.

#### **4.2.4.1 Factores operacionales.**

La viabilidad para el reciclaje del agua producida depende de una serie de factores operacionales entre los que se encuentran: <sup>89</sup>

- La calidad del agua producida, incluyendo la tendencia a producir escamas.
- Disponibilidad de espacio en campo.
- Necesidad de procesamiento de las aguas.
- Concentración de sólidos y aceite en el agua.
- Niveles de radioactividad.
- Acceso a fuentes de agua fresca.
- Tasas de recuperación del agua.
- Impacto del tratamiento del agua en la eficiencia de los aditivos químicos.

---

<sup>89</sup> NYSDEC, New York State department of environmental conservation. Op. cit.

- Disponibilidad de opciones de disposición.
- Disponibilidad de plantas de tratamiento cerca de las zonas productoras.
- **Cantidad de agua producida.**

Grandes volúmenes de agua requerida presentan un gran reto operacional que puede ser abordado desde dos puntos de vista diferentes.

- a) Si un pozo produce grandes volúmenes de agua residual (mayor al 15% del agua inyectada)<sup>90</sup> requerirá de una gran logística para el movimiento de esa agua residual y de una disponibilidad de grandes espacios en campo para el almacenamiento de estas aguas mientras se lleva a cabo esta logística y específicamente al hablar de reciclaje de aguas, será un factor determinante al escoger plantas de tratamiento en sitio o plantas de tratamiento industriales.
- b) Si se trata de un pozo seco, en el cual retornan a superficie pequeños porcentajes del agua inyectada (5-8%)<sup>91</sup>, donde las características de la formación tienen a atrapar el agua en la formación, conocido como imbibición, se tendrán bajas tasas de producción de agua residual con respecto al agua inyectada, en estos casos uno de los principales retos será la necesidad de buscar otras fuentes de agua para un nuevo trabajo de fractura en la cadena del manejo del agua.

- **Producción de agua de retorno.**

La duración en tiempo del agua producida puede ser fundamental al tomar la decisión sobre el reciclaje de las aguas residuales, pozos que producen grandes volúmenes iniciales de agua pueden ser difíciles de manejar aplicando tratamientos

---

<sup>90</sup> MANTELL, M. Op. cit.

<sup>91</sup> Ibid.

avanzados de agua y una mejor logística de movimiento continuo de tanques y camiones a sitios cercanos (trabajos de fracturamiento en la misma zona). Sin embargo, eso no implica que grandes volúmenes de agua residual inicial sean perjudiciales al momento de elegir el reciclaje de aguas como opción para el manejo de aguas, por el contrario entre mayor volumen de agua residual inicial menor será el agua fresca requerida para nuevos fluidos de fractura y en pozos donde la producción de agua sea continua pero en pequeñas cantidades el reuso será menos atractivo.<sup>92</sup> Hablar de grandes tasas iniciales, hace referencia a recuperar más de 500.000 galones por pozo durante los primeros 10 días de recuperación o a recuperar entre el 10-15% del agua requerida para fracturar nuevos pozos.<sup>93</sup>

- **Calidad de agua.**

El principal aspecto es la calidad del agua, generalmente los parámetros a considerar son TDS, TSS, compuestos que pueden facilitar incrustaciones (Ca, Mg, Ba y sulfatos) y la tendencia al crecimiento de bacterias que puede afectar drásticamente la viabilidad de reuso del agua, para este último en particular un tratamiento biológico será necesario, para los otros parámetros los operadores elegirán cuales contaminantes será necesario tratar, tal como se mencionó anteriormente en algunas ocasiones se opta por eliminar solidos suspendidos y reusar el agua sin aplicar algún tipo de tratamiento de consideración.<sup>94</sup>

Teniendo en cuenta el capítulo 3, se evidencia que es importante escoger un sistema adecuado de tratamiento partiendo de la calidad del agua para evitar afectar la productividad del pozo. Hay grandes variaciones en la geoquímica del flowback entre una formación y otra y actualmente hay una gran variedad de posibilidades de reformulación química para crear nuevos fluidos de fractura a tal punto que no existe

---

<sup>92</sup> STARK, M. Op. cit.

<sup>93</sup> MANTELL, M. Op. cit.

<sup>94</sup> MANTELL, M. Op. cit.

una calidad generalizada o estándar del agua para el reciclaje. Sin embargo, en el anexo 2 se muestran los niveles recomendados por algunos autores de la calidad de agua que debería tener un agua para su reutilización comparado con el promedio de calidad de agua de algunos de los principales Shale en Estados Unidos.

#### **4.2.4.2 Factores económicos.**

Para el análisis de las diferentes opciones de residuos es necesario considerar los costos más representativos de cada opción de residuos, para el caso del reuso, el costo asociado al tratamiento de aguas es el más importante.

- **Costos**

Usar tratamientos para llevar el agua residual a niveles de agua fresca para su reutilización es la opción más costosa, por ejemplo, la cristalización y la evaporación son las tecnologías que se presentan como mejores opciones para el tratamiento de salmueras y aguas con altos niveles de TDS, sin embargo, son opciones muy costosas debido a sus altos consumos energéticos.<sup>95</sup>

Para evitar estos altos costos las compañías de servicios han trabajado en los aditivos químicos usados para los fluidos de fractura con el fin de crear aditivos tolerantes a altas concentraciones de TDS, logrando fabricar fluidos de fractura a partir de agua residual sin la necesidad de aplicar un tratamiento avanzado.

- a) **Tratamiento:** El costo del tratamiento dependerá de la tecnología de tratamiento y energía consumida. Este es uno de los costos más variables debido a que la instalación de un tratamiento en campo puede llegar a variar los costos y en algunas ocasiones será necesario aplicar más de un

---

<sup>95</sup> STARK, M. Op. cit.

tratamiento<sup>96</sup> (los costos de los tratamientos varían desde <2 USD hasta los 10 USD/ Barril)<sup>97</sup>.

**b) Disposición desechos del tratamiento:** El costo de disposición varía de acuerdo al método escogido, a pesar de que el vertimiento de residuos en el suelo es una alternativa posible, generalmente la disposición de estos residuos sólidos (sales en mayor proporción) se realiza por medio de inyección de pozos. Es necesario aclarar que generalmente los tratamientos que generan cantidades considerables de desechos sólidos son los tratamientos avanzados, por lo tanto, se desprecian para efectos de este trabajo<sup>98</sup>.

Los costos también incluyen transporte y disposición de agua, los cuales fueron nombrados en el tema de inyección en pozos subterráneos.

#### **4.2.4.3 Factores ambientales.**

Los aspectos ambientales asociados a cada metodología de disposición afectarán directamente la percepción social sobre la operación que se realiza en la zona, por esto debe buscar realizar las operaciones con el menor impacto ambiental posible.<sup>99</sup> Se hace mención a los aspectos ambientales en general positivos o negativos. Los aspectos ambientales asociados al reciclaje de aguas se basan en la resolución 0431 de 2014:

- **Demanda de agua.**

---

<sup>96</sup> BLAUCH, M. Marcellus Shale Post-Frac Flowback Waters - Where is all the salt coming from and what are the implications? Superior Well Services Inc. Society of Petroleum Engineers. 2009

<sup>97</sup> NATIONAL PETROLEUM COUNCIL. Op.cit.

<sup>98</sup> STARK, M. Op. cit.

<sup>99</sup> Taylor, T. Op. cit

Teniendo en cuentas los grandes volúmenes de agua que se utilizan en el fracking, es importante utilizar métodos de disposición que se enfoquen en transformar los residuos líquidos a subproductos y esto es un aspecto clave en el reuso de aguas de producción.<sup>100</sup>

- **Tratamientos Avanzados.**

Utilizar tratamientos avanzados requiere altos consumos de energía. Además, pueden estar asociados a altas emisiones de gases a la atmosfera, una alta generación de residuos sólidos y agua residual que no puede ser utilizada para ninguna actividad lo que obliga a buscar opciones de disposición para estos residuos<sup>101</sup>. Todos estos desechos o la posible volatilización de livianos pueden llegar a afectar a los trabajadores que entren en contacto directo.

- **Tráfico.**

Si se consideran los tratamientos en campo como la opción a utilizar además de disminuir los costos por este concepto se estará ayudando a disminuir los niveles de emisión causados por este aspecto en el proyecto de fracturamiento, si tenemos en cuenta que las cantidades de agua residual pueden alcanzar los 600.000 galones por pozo en algunos Shale, se estará contribuyendo en gran medida a la disminución de estos niveles de contaminación de aire.<sup>102</sup>

### **4.3 DESCARGA DE RESIDUOS.**

La descarga de los residuos líquidos puede hacerse en el suelo (en vertederos de manera controlada) o en cuerpos de agua, generalmente cuerpos de agua dulce luego de pasar por un tratamiento avanzado. Actualmente los objetivos centrales

---

<sup>100</sup> HANSEN, E. Op. cit.

<sup>101</sup> MANTELL, M. Op. cit.

<sup>102</sup> STARK, M. Op. cit.

del manejo de aguas de producción son la protección del medio ambiente, lograr un proceso eficiente para el control de los residuos líquidos y minimizar el transporte de estos residuos con el fin de evitar sobrecostos, por esto la descarga de residuos no es una opción muy considerada.

La disposición en cuerpos de agua está prohibida en Colombia y la descarga en suelos en Estados Unidos se ha limitado a fluidos altamente contaminados o a residuos sólidos; para el caso de Colombia la descarga en suelos debe cumplir con la norma vigente<sup>103</sup>.

Para la descarga de residuos se deben tener una serie de factores y desafíos, algunos de estos son:

- Se requiere tratamiento.
- Se requiere disponer los residuos de los tratamientos.
- Regulación ambiental es cada vez más rigurosa.
- Impactos ambientales potenciales.
- No se logra reducir la cantidad de residuos ni la disminución de la cantidad de agua dulce requerida.
- Calidad del agua varía (disminuye) con el tiempo.
- Los altos niveles de TDS limita las opciones de tratamiento.<sup>104</sup>

Aunque esta opción de disposición no será tomada en cuenta en la herramienta, debido a las limitaciones que contempla en la normatividad Colombiana, el propósito de su mención es la presentación de una opción para la gestión de los residuos líquidos, es importante tener en cuenta las críticas actuales sobre la pérdida del agua relacionada a las prácticas que ocasionan una eliminación del agua del ciclo

---

<sup>103</sup> MANTELL, M. Op. cit.

<sup>104</sup> ALLEMAN, D. Considerations for treating water associated with shale gas development. All Consulting, 2010.

hidrológico, siendo este un factor fundamental al plantear esta alternativa de disposición<sup>105</sup>.

#### **4.3.1 Normativa en Colombia**

La resolución 0421 de 2014 menciona que no será permitida la descarga de fluidos asociados a YNC en cuerpos de agua, sanción que se confirma en la resolución 0631 de 2015 en la cual se establecen los parámetros y valores límite permitidos para vertimientos, donde se establece que no será permitido ningún tipo de vertimiento hasta tanto el ministerio de medio ambiente cuente con la información técnica que permita establecer parámetros y valores máximos permisibles para un posible vertimiento de estos residuos en cuerpos de agua.

Para el caso de vertimiento en suelos en la resolución 0421 de 2014 se establecen los requisitos e información que se debe presentar en el EIA para establecer los diferentes puntos de vertimiento de estas aguas residuales; así mismo se establecen los parámetros que se deben medir de la calidad del agua para realizar este tipo de operación.

#### **4.3.2 Panorama actual en Estados Unidos.**

Actualmente las facilidades de descarga en los estados que pueden llegar a tratar las aguas de producción a niveles permitidos son escasas y estas opciones llegan a ser muy costosas para los operadores. Además, los reguladores han aumentado los parámetros mínimos de entrada de estos fluidos a las POTW, lo que implica un tratamiento previo en campo. Para la descarga de los residuos sólidos luego del tratamiento, estos generalmente son enviados a campos de vertimiento de residuos

---

<sup>105</sup> MANTELL, M. Op. cit.

aprobado<sup>106</sup>. En la tabla 6 se puede observar los porcentajes de disposición por tipo de residuo en el periodo de junio a diciembre del año 2012, en estos datos, se puede observar que para residuos líquidos la descarga en suelos o cuerpos de agua fue casi nula y la descarga en suelos fue una alternativa utilizada para residuos sólidos.

**Tabla 6.** Descarga de residuos en Pensilvania 2012.

Tipo Residuo	Tratamiento / Descarga	Vertimiento suelos
Sedimentos	0%	28%
Cortes perforación	0%	96%
Fluidos de perforación	0%	4%
Flowback Sand	0%	23%
Flowback fluid	0%	0%
Aguas producción	0%	0%
Fluidos completamiento	1%	69%
Lubricante gastado	79%	1%

**Fuente:** Base de datos departamento de medio ambiente de PA, reportes de operador. [En línea].  
 Disponible en:

<https://www.paoilandgasreporting.state.pa.us/publicreports/Modules/DataExports/DataExports.aspx>  
 . [Último acceso: 05/05/16]

Algunas operadoras como Chesapeake Energy, que opera los principales Shale en US, en su política de manejo de residuos se encuentran el no realizar descargas en cuerpos de agua, ya sean descarga directa o descarga por medio de plantas de tratamiento, de ningún tipo de agua producida<sup>107</sup>.

#### 4.4 RECICLAJE

El reciclaje de aguas residuales hace referencia al uso de estas aguas para otras actividades ajenas a la industria petrolera. Los grandes volúmenes de agua

<sup>106</sup> DOWNING, B. Will Ohio start accepting drilling brine at 40 landfills? 2013.

<sup>107</sup> MANTELL, M. Op. cit.

producida pueden ser tomados como una fuente adicional para la demanda local de agua en las comunidades. Por ejemplo, en Australia, Sur América y Estados Unidos, el reciclaje del agua de producción en yacimientos convencionales ha disminuido la demanda de agua potable por parte de algunas actividades como la agricultura, esto ha ayudado a los operadores a facilitar licencias ambientales o tener una mejor percepción social. Sin embargo, el agua producida es constantemente regulada como un residuo limitando sus posibles usos, en especial para un agua residual en YNC, ya que estas retornan a superficie con una mayor cantidad y concentración de contaminantes.<sup>108</sup>

Algunos usos que se le pueden dar al agua residual del fracking pueden ser: Irrigación de campos, lavados industriales o agua para el ganado. Es importante resaltar que para poder ser utilizada por alguno de estos sectores el agua residual debe pasar por una serie de tratamientos para garantizar su calidad.

#### **4.4.1 Reciclaje VS reuso.**

A pesar de que el reuso y el reciclaje tienen un mismo objetivo (buscar que el agua no se considere un residuo a eliminar, por el contrario que se considere un recurso o subproducto a valorar), se debe entender cuáles son los aspectos que diferencian estas dos opciones.

La principal diferencia radica en el fin que tendrá el agua, mientras que en el reuso se enfoca en usar el agua nuevamente en la industria petrolera, en el reciclaje se busca utilizar estas aguas para otro tipo de actividades ya sea, para la generación de energía, producción de alimentos, riego agrícola, ganadería, entre otras opciones.

---

<sup>108</sup> MIDDAGH, M., et al. A new view of produced water: Resource, not waste. ENVIRON. Society of Petroleum Engineers. 2015.

Generalmente el requerimiento de calidad para el uso del agua en estas industrias es mayor que para el uso en la industria petrolera, por esto el nivel de tratamiento para el reciclaje de aguas es mayor que en el re-uso.

La principal ventaja del reciclaje es la posibilidad de disminuir el consumo de agua fresca por parte de otras industrias en la zona, lo que favorece a disminuir la demanda de agua en la zona y facilitar la operación de las diferentes industrias, incluida la industria petrolera, ayudando a mitigar posibles impactos ambientales por escasez de agua o dificultades para en el abastecimiento de agua para futuras operaciones. Además, como se mencionó anteriormente, a pesar de que el re-uso también se enfoca en disminuir la demanda de agua en la zona, las oportunidades de re-usar el agua para futuras operaciones no siempre estará disponible inmediatamente, por lo cual el reciclaje puede ser una opción a considerar en estos casos.

#### 4.4.2 Panorama en Estados Unidos

Para Estados Unidos, se pueden distinguir los límites máximos permisibles a los cuales el tratamiento escogido debe dejar las aguas residuales para cada industria en particular. Además, se han desarrollado ciertas herramientas específicas en el tema, debido a que para cada sector la calidad de agua es diferente y los parámetros de calidad varían. En la tabla 6 se puede observar la recopilación de estos datos.

**Tabla 7.** Límites de calidad de agua para reciclaje en Estados Unidos.

Parámetro/Actividad	Irrigación Campos	Recarga Acuíferos	Ganadería	Descarga cuerpos agua
TDS (mg/L)	1500	500	5000	1000
Bario (mg/L)	-	2	-	1

Magnesio (mg/L)	-	-	250	-
Hierro (mg/L)	5	0.3	-	0.3

**Fuente:** Drewes O. 2011

#### **4.4.3 Reciclaje de aguas colombianas.**

Según el último estudio nacional de agua realizado por el instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales en Colombia (IDEAM) , publicado en agosto de 2015, la industria petrolera es la segunda que menos consume para sus procesos en el país, mientras que la agricultura y ganadería son los sectores industriales que mayor consumo tienen, por esto el reciclaje de aguas con el fin de ser utilizadas para estas otras industrias puede ser una opción atractiva para mejorar el aprovechamiento de los recursos hídricos en el país y mejorar la percepción que se tiene de la industria de hidrocarburos.

Además, con la resolución 0631 de 2015 en el país se busca disminuir los porcentajes de vertimiento y reutilizar o reciclar las aguas residuales producto de las diferentes etapas en la operación. Teniendo en cuenta que los niveles de calidad de agua que se requieren para ser usadas en otras industrias puede variar dependiendo del sector, se tomará en cuenta los niveles sugeridos por la norma. En el anexo 2 se pueden observar los máximos valores permisibles de cada parámetro para la descarga de aguas en la industria de hidrocarburos en la etapa de producción. Se usan estos parámetros establecidos con el fin de asegurar que, si se cumplen los niveles de la norma, será posible utilizar estas aguas para cualquier industria.

#### **4.4.4 Factores a considerar.**

En este trabajo se realizará una descripción cualitativa de los criterios a considerar en el manejo de residuos mediante el reciclaje.

Teniendo en cuenta que el reciclaje y el reuso son operaciones similares, los factores asociados a ellos son muy similares, por eso a continuación se complementan dichos factores.

#### **4.4.4.1 Factores operacionales.**

El principal factor operacional relacionado directamente con el reciclaje de estas aguas, es el alto nivel de tratamiento que se deben aplicara estas aguas para ser utilizadas en otras industrias, además se debe considerar la capacidad de transporte que se debe tener en la zona.

Adicional a esto se debe tener en cuenta que un mayor nivel de tratamiento implica una mayor cantidad de residuos sólidos luego de este tratamiento, por lo que se debe tener en cuenta cuales son los planes de manejo que se van a tener para este tipo de residuos.

#### **4.4.4.2 Factores económicos.**

Los factores económicos serán determinantes en la viabilidad del proyecto; para el manejo de aguas residuales la adquisición de agua fresca y logística de disposición de flowback en los shale puede ser un problema. El desarrollo de YNC requiere estrategias en el manejo del agua que tengan en cuenta la capacidad de adquisición de agua en la zona para evitar sobrecostos de transporte y precio de la misma. Los costos asociados al manejo del agua son: adquisición, transporte y disposición. En términos de transporte, es necesario considerar el costo de transportar los desechos tratados a su punto de disposición final.

#### **4.4.4.3 Factores ambientales.**

El aspecto ambiental asociado a cada metodología de disposición afectará directamente la percepción social sobre la operación que se realiza en la zona, por esto debe buscar realizar las operaciones con el menor impacto ambiental posible. Los aspectos ambientales asociados a la inyección de residuos se basaron principalmente en la resolución 0431 de 2014 y el anexo 3 que hace referencia al desarrollo de yacimientos no convencionales.

- **Demanda de agua.**

El agua usada por la industria se tiene tanto de fuentes públicas como privadas, su ciclo en la industria es extracción, utilización y devolución al medio ambiente en algunos casos. Este recurso atrae la atención de la comunidad, entidades gubernamentales y reguladores por lo que el agua usada en el fracturamiento hidráulico a menudo es noticia con connotación negativa.

Como se ha mencionado anteriormente para el desarrollo del proyecto se debe presentar un informe detallado al ANLA de la demanda de los recursos naturales que requiera el proyecto durante las diferentes fases del mismo y presentar un programa de ahorro y uso eficiente del agua de acuerdo con la Ley 373 de 1997 por lo que el reciclaje es una opción que busca fomentar el buen uso del agua.

- **Transporte de residuos.**

El tráfico de camiones es uno de los mayores impactos a las comunidades cercanas a la explotación como se ha mencionado anteriormente y para el caso del reciclaje.

## **5. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE UNA HERRAMIENTA QUE APOYE LA TOMA DECISIÓN EN EL MÉTODO DE DISPOSICIÓN DE AGUAS RESIDUALES EN YNC**

Debido a la importancia del manejo de aguas residuales y la variabilidad de los factores que afectan la toma de una decisión, se hace necesario desarrollar una

herramienta que siga una metodología que evalúe integralmente las diferentes opciones de disposición.

Teniendo en cuenta que los diferentes factores pueden variar de un caso a otro, la metodología descrita propone el uso de las técnicas de análisis multicriterio, ya que éstas emplean la comparación de las diferentes alternativas por medio de la puntuación de estas frente a cada uno de los criterios, con el fin de escoger la opción más conveniente. Además, es una de las opciones más utilizadas para la toma de decisiones en el manejo de recursos hídricos.<sup>109</sup>

Para la implementación y el uso de una metodología para la toma de decisiones, es aconsejable el desarrollo de una herramienta software, que facilite al usuario la visualización de la metodología propuesta.

## **5.1 ANÁLISIS MULTICRITERIO**

Un problema de decisión puede considerarse como un problema multicriterio si existen al menos dos criterios en conflicto y al menos dos alternativas de solución. En otras palabras, en un problema de decisión multicriterio se trata de identificar la mejor o las mejores soluciones considerando simultáneamente múltiples criterios en competencia.

El análisis multicriterio el cual es un método que se utiliza para evaluar diversas posibles soluciones a un determinado problema, considerando un número variable de criterios, se utiliza para apoyar la toma de decisiones en la selección de la solución más conveniente.

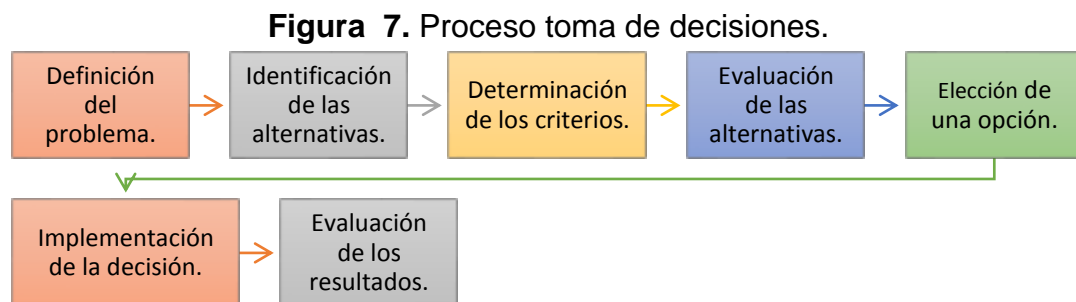
---

<sup>109</sup> HAJKOWICZ S., HIGGINS A. A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. *European Journal of Operational Research*. 2008. Pág 255–265.

La ventaja de utilizar este método de decisión es que simplifica situaciones complejas, permite avanzar paso a paso hacia la búsqueda de una solución, con toda transparencia, las bases sobre las que se realiza la selección de los criterios y la puntuación de los resultados son a menudo sencillas, comprensibles y determinadas por el grupo que conduce el análisis, y finalmente permite una valoración estable de los diferentes elementos incluidos en el análisis, por lo que racionaliza el proceso de toma de decisiones.

El diseño del método de análisis multicriterio inicia con una fase de inicial la cual básicamente consiste en la definición del problema, las variables, los objetivos y la colección de datos, seguida de una fase de diseño y finalmente la fase de elección, donde se evalúan las diferentes alternativas y se da una respuesta final<sup>110</sup>.

A continuación, se puede observar el proceso a seguir en la resolución de problemas usando análisis multicriterio:



**Fuente.** PEREZ, A. La decisión multicriterio: aplicación en la selección de ofertas competitivas en edificación. Curso Máster en Edificación Especialidad Gestión Curso. 2012-2013. La herramienta de análisis multicriterio puede ser complementada con otras herramientas según las necesidades particulares de cada situación, entre estas se encuentra el panel de expertos, los cuales toman participación en las ponderaciones.

### 5.1.1 Clasificación de los métodos de análisis multicriterio

<sup>110</sup> TOBON, W. Análisis multicriterio. Taller: Información sobre biodiversidad para la conservación medioambiental. CONABIO. 2013.

Los métodos de análisis multicriterio se pueden clasificar según el número de alternativas a tener en cuenta en la decisión, las cuales pueden ser finitas o infinitas. Cuando las funciones objetivo toman un número infinito de valores distintos, que conducen a un número infinito de alternativas posibles del problema se llama métodos de análisis multicriterio multiobjetivo y cuando las alternativas de decisión son finitas se denominan problemas de métodos de análisis multicriterio discreto (MAMD), los cuales son más comunes en la realidad y los considerados para el desarrollo de la herramienta.

El análisis o evaluación multicriterio se define como un conjunto de técnicas orientadas a asistir en procesos de decisión, el cual se basa en la ponderación y compensación de variables que van a influir de manera positiva (Aptitud) o negativa (Impacto) sobre el objeto de decisión. Algunos de los métodos que se utilizan en los casos de MAMD son los siguientes: Ponderación Lineal (scoring), Utilidad multiatributo (MAUT), Relaciones de superación y el Proceso analítico Jerárquico (AHP - Analytic Hierarchy Process).<sup>111</sup>

#### **5.1.1.1 Ponderación Lineal (scoring):**

Es una manera rápida y sencilla para identificar la alternativa preferible en un problema de decisión multicriterio, ya que aborda situaciones de incertidumbre con pocos niveles de información donde se construye una función de valor para cada una de las alternativas.

La respuesta está basada en las preferencias o la comparabilidad del ejecutor, por lo cual es un método manipulable que depende del valor de importancia dado a cada criterio.

---

<sup>111</sup> HURTADO, T., BRUNO, G. El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la Toma de Decisiones en la Selección de Proveedores. Tesis. UNMSM.

Las etapas del método son las siguientes:

- Identificar la Meta General del Problema y las alternativas.
- Listar los criterios a emplear en la toma de decisión.
- Asignar una ponderación para cada uno de los criterios.
- Establecer en cuanto satisface cada alternativa a nivel de cada uno de los criterios.
- Calcular el Score para cada una de las alternativas.
- La alternativa con el Score más alto representa la alternativa a recomendar

**Ecuación 1. Ponderación lineal**

$$S_j = \sum w_i r_{ij}$$

Dónde:

$r_{ij}$  = rating de la alternativa j en función del criterio i

$W_i$  = ponderación para cada criterio i.

$S_j$  = score para la alternativa j.

**Fuente:** ROEVIS L, <<Ponderación lineal (scoring)>> [En línea]. Disponible en:  
<http://unisistemasoptimo.blogspot.com.co/2012/05/ponderacion-lineal-scoring.html>

### 5.1.1.2 Utilidad Multiatributo (MAUT):

Los modelos de utilidad multiatributo están diseñados para obtener la utilidad de alternativas que tienen más de un atributo valioso; por lo tanto, deben ser evaluados de acuerdo con más de un criterio.

Para cada atributo se determina la correspondiente función de utilidad y luego se agregan en una función de utilidad multiatributo de forma aditiva o multiplicativa. Al determinarse la utilidad de cada una de las alternativas se consigue una ordenación completa del conjunto finito de alternativas, es decir, simplemente se pondera y agrega las utilidades derivadas de los atributos individuales con el fin de obtener

una utilidad general para cada alternativa. Entonces se escoge la alternativa cuya puntuación de utilidad generalmente sea la más alta.

#### **5.1.1.3 Relaciones de Superación:**

Estos métodos usan como mecanismo básico el de las comparaciones dos a dos de las alternativas, criterio por criterio. Básicamente es mirar si la alternativa a es al menos tan buena como la alternativa b y de esta forma, generar una jerarquía agregada.

#### **5.1.1.4 Proceso Analítico Jerárquico:**

Fue desarrollado por el matemático Thomas Saaty en 1980 y consiste en formalizar la comprensión intuitiva de problemas complejos mediante la construcción de un Modelo Jerárquico. El propósito del método es permitir que el agente decisor pueda estructurar un problema multicriterio en forma visual, mediante la construcción de un modelo que básicamente contiene tres niveles: objetivo, criterios y alternativas. Además, involucra tanto criterios cualitativos como cuantitativos.

Una vez construido el Modelo Jerárquico, se realizan comparaciones por pares entre dichos elementos (criterios-subcriterios y alternativas) y se le atribuyen valores numéricos. Una vez obtenido el resultado final, el AHP permite llevar a cabo el análisis de sensibilidad del modelo. Es necesario seleccionar un método para aplicarlo al problema de la selección del método de disposición para aguas residuales de shale plays. Este problema se pretende abordar mediante la aplicación de una técnica para la toma de decisiones multicriterio de manera que pueda evaluarse cada una de las diferentes alternativas que componen en conjunto las tecnologías para la disposición final de aguas residuales con respecto al conjunto de criterios establecidos.

Considerando lo anterior, y las características propias del problema asociado a la selección del método de disposición para aguas residuales de shale plays, se optó por el método de scoring o ponderación lineal.

## 5.2 SELECCIÓN DE CRITERIOS Y SISTEMAS DE PONDERACIÓN

De acuerdo con Gladwell y Loucks (1999) la selección de un sistema de gestión de aguas de producción debe identificar un conjunto de criterios de evaluación teniendo en cuenta aspectos tanto técnicos como ambientales, económicos y sociales<sup>112</sup>.

### 5.2.1 Criterios y subcriterios de evaluación

Los criterios que se utilizaron para evaluar y comparar las opciones se llaman criterios de evaluación, los cuales fueron seleccionados en base a la bibliografía consultada, soportada en el capítulo 4 y agrupados en tres grupos principales: criterios ambientales, criterios técnicos u operacionales y criterios económicos.

En la tabla a continuación se pueden observar la clasificación de los criterios, así como su abreviación para facilitar su evaluación e identificación; el primer subíndice corresponde al criterio de decisión y el segundo a los subcriterios considerados.

**Tabla 8.** Criterios de la herramienta.

<b>Nombre</b>	<b>Código</b>
<b>Ambientales</b>	CA
Demanda de Agua	CA1
Ciclo Hidrológico	CA2
Tráfico de camiones	CA3
Contaminación de aguas	CA4

<sup>112</sup> MOFARRAH, A. Decision making tool for produced water management: an application of multicriteria decision making approach. Universidad de Newfoundland. 2008.

Energía consumida	CA5
Emisiones de gases de efecto invernadero	CA6
Micro sismicidad inducida	CA7
Efectos en la salud	CA8
Radioactividad	CA9
<b>Operacionales</b>	CO
Capacidad	CO1
Disponibilidad del agua	CO2
Calidad del agua	CO3
Agua recuperada	CO4
Acceso de tráfico	CO5
Energía eléctrica disponible	CO6
<b>Económicos</b>	CE
Costo Agua	CE1
Costo del transporte	CE2
Costo asociado a la disposición.	CE3

## CRITERIOS AMBIENTALES

**Demanda de Agua (CA1):** Este criterio hace referencia a la competencia del agua en la zona con otros sectores: Industrial, agrícola, ganadero, etc. Se relaciona con el alto consumo de agua para el desarrollo de yacimientos no convencionales y se analizan 3 posibles escenarios: Zonas con una alta demanda de agua, zonas con una moderada demanda de agua y zonas con baja demanda de agua.

**Ciclo Hidrológico (CA2):** Se refiere al agua que se pierde del ciclo hidrológico durante la operación.

**Tráfico de camiones (CA3):** Incluye emisiones de gases de efecto invernadero, ruido producido por los automotores, deforestación al talar árboles para la construcción de nuevas vías, entre otros. Se consideran dos posibles escenarios: Zonas con bajo tráfico de camiones y zonas con alto tráfico de camiones.

**Contaminación de aguas (CA4):** La contaminación de aguas causada por la industria de yacimientos no convencionales (YNC) está asociada principalmente a derrames o fugas de los diferentes fluidos utilizados o generados por la industria que llegan a cuerpos de agua superficial por medio de escorrentía lo que puede causar un impacto ambiental. Además, a la contaminación de aguas subterráneas causadas por filtraciones desde superficie y a problemas de malas cementaciones, revestimientos inadecuados, corrosión y cemento inapropiado.

**Energía consumida (CA5):** Hace referencia a la energía el total usada por cada método de disposición.

**Emisiones de gases de efecto invernadero (CA6):** Hace referencia a las emisiones de gases de invernadero generadas por las plantas de tratamiento y equipos de la operación.

**Micro sismicidad inducida (CA7):** Hace referencia al riesgo a generar microsismos en la zona, los cuales están relacionados a la inyección de aguas residuales asociados a la producción de petróleo y gas.

**Efectos en la salud (CA8):** Hace referencia al efecto en la salud de los trabajadores debido al contacto directo con los desechos líquidos y sólidos o la inhalación de contaminantes volátiles.

**Radioactividad (CA9):** Hace referencia a los riesgos asociados a la disposición de aguas residuales que puedan estar contaminadas con NORM.

## **CRITERIOS OPERACIONALES**

**Capacidad (CO1):** Hace referencia a la capacidad de las facilidades de superficie y al espacio en campo para almacenamiento, tratamiento o inyección de residuos.

**Disponibilidad del agua (CO2):** Hace referencia a la capacidad hídrica que hay en la zona para suplir la demanda de agua de las futuras operaciones.

**Calidad del agua (CO3):** La calidad de agua depende de varios parámetros como: TDS, orgánicos, calcio, entre otros. Dependiendo de la concentración de estos contaminantes y los requerimientos de cada método de disposición el tratamiento requerido puede variar. El grado de tratamiento varía según la calidad del afluente y se pueden usar tratamientos primarios, secundarios o terciarios (avanzados) según sea el caso.

**Agua recuperada (CO4):** Hace referencia a las tasas de recuperación del agua en el pozo, es decir grandes tasas iniciales o pequeñas tasas durante la vida productiva del pozo.

**Acceso de tráfico (CO5):** Hace referencia al estado de las vías para el acceso al tráfico pesado necesario para el transporte en la cadena del agua.

**Energía eléctrica disponible (CO6):** Hace referencia a la energía consumida para el óptimo funcionamiento del método de disposición.

## **CRITERIOS ECONÓMICOS**

**Costo Agua (CE1):** Hace referencia al costo de agua fresca para llevar a cabo el siguiente proceso de fracturamiento por barril.

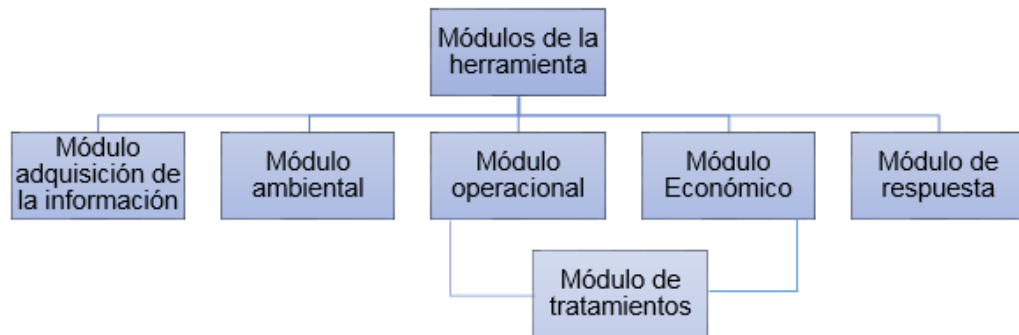
**Costo del transporte (CE2):** Hace referencia al costo de transporte por barril en la zona, ya sea para el transporte de agua fresca o para el transporte de los residuos al sitio de disposición.

**Costo asociado a la disposición (CE3):** Hace referencia a los costos directos de la disposición, es decir, al costo por barril de inyectar los residuos en un pozo de inyección o al costo de tratamiento por barril en las plantas de tratamiento, el cual varía según el grado de tratamiento.

### 5.2.2 Metodología de selección.

La herramienta se encuentra dividida en módulos para hacer más fácil su ponderación y entendimiento, cada módulo corresponde a los criterios usados, es decir, ambientales, operacionales y económicos, además, incluye el módulo de tratamientos el cual complementará el modulo económico y operacional. El método de adquisición de la información y esquema de ponderación varía en cada caso, por esta razón se hace necesario dividirlo de esta manera.

**Figura 8.** Módulos de la herramienta.



En primer lugar, se toman los datos del pozo y de la zona para asignar un puntaje a cada variable para cada método de disposición. Esta puntuación se basa en consideraciones realizadas a partir de la bibliografía consultada y opiniones de expertos, luego, para el caso de los criterios ambientales y operacionales se realiza una ponderación a partir del producto entre el puntaje obtenido y la importancia de cada criterio y así se obtiene un resultado parcial para cada método de disposición de estos dos módulos. El módulo económico, por el contrario, se basa en la comparación de los costos asociados a cada método de disposición.

Una vez terminada la etapa de evaluación, se consolida la ponderación y se muestra el método de disposición con mayor puntuación, es decir el método que mejor se adapta a las condiciones inicialmente dadas por el usuario.

Además, teniendo en cuenta que el tratamiento de aguas es clave en el momento de elegir un método de disposición, se desarrolló un módulo adicional que busca elegir el tratamiento más adecuado para cada condición en particular, con el fin de complementar los módulos operacional y económico.

#### **5.2.2.1 Modulo de adquisición de la información.**

Con el fin de obtener toda la información necesaria del pozo y de la zona, al inicio de la herramienta, el usuario ingresa manualmente los datos respondiendo las preguntas requeridas, estas preguntas se muestran en las figuras de la 8 a la 15. Para el funcionamiento de la herramienta es necesario que el usuario responda todas las preguntas.

Para cada pregunta se puede encontrar un icono azul, el cual al pasar el clic del mouse encima de él muestra información donde se explica el significado de las posibles respuestas con el fin de orientar al usuario al momento de responder.

- **Información de campo:** Contiene preguntas relacionadas al campo y pozo de estudio. Entre las cuales se encuentra información general como nombre y ubicación, y preguntas más específicas como la disponibilidad del agua (fuentes de abastecimiento) en el campo para futuras operaciones. En esta sección existen tres formas de preguntas; la primera otorgando un número de 1-5 donde uno indica el peor escenario y 5 el mejor escenario. Es decir, por ejemplo, para el mismo ítem de disponibilidad de agua 1 indicaría que no existe abastecimiento suficiente cerca al pozo y 5 que el abastecimiento es más que suficiente; lo mismo ocurre para las otras preguntas. La segunda forma es una pregunta de si o no, relacionada a si se recuperan altas tasas durante la vida del pozo, al responder si, el usuario afirma la oración, al marcar no la contradice, es decir, que las tasas de recuperación de agua son pequeñas. Finalmente, la última forma de pregunta

corresponde a la capacidad de almacenamiento, en la cual se tiene la opción de marcar alta o baja, donde una alta capacidad de almacenamiento corresponde a contar con las facilidades necesarias de almacenamiento (frack tanks y tanques de almacenamiento) para almacenar el total de agua producida por el pozo durante toda la operación.

**Figura 9.** Información del campo.

Nombre del pozo:	<input type="text"/>	Nombre del campo:	<input type="text"/>
Ubicación del campo:	<input type="text"/>	Empresa operadora:	<input type="text"/>
Disponibilidad de agua:	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>
Tamaño del campo:	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>
Acceso de tráfico:	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>
Energía disponible:	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>	<input type="text" value="1"/>
Recuperación de agua residual:	<input type="radio"/> Si	<input checked="" type="radio"/> No	<input type="text" value="1"/>
Capacidad de almacenamiento:	<input type="radio"/> Alta	<input checked="" type="radio"/> Baja	<input type="text" value="1"/>

- **Información de calidad del agua:** Con esta sección se pretende conocer los parámetros de calidad de agua, los cuales deben ser ingresados en ppm; donde 1 ppm corresponde a 1mg/L. Se consideraron los parámetros más importantes a la hora de definir un método de disposición y tratamiento, entre los cuales destacan: Total de sólidos disueltos, cantidad de orgánicos, total de sólidos suspendidos, entre otros.






**Figura 10.** Información calidad del agua

Ingresar todos los datos en ppm

Total de sólidos suspendidos (TDS):	<input type="text"/>
Total de sólidos disueltos (TSS):	<input type="text"/>
Calcio:	<input type="text"/>
Magnesio:	<input type="text"/>
Material radioactivo (NORM):	<input type="text"/>
Orgánicos:	<input type="text"/>

- **Información de la zona:** Es esta sección las preguntas van relacionadas a la zona donde está ubicado el pozo de estudio. Entre las preguntas se tiene en cuenta la existencia de facilidades de disposición como plantas de tratamientos, pozos inyectores, y pozos de abandonados con el fin de reconvertirlos a pozos inyectores, y condiciones de la zona como la demanda de agua y la existencia de poblaciones aledañas a la operación. Las preguntas son de tipo si/no.

**Figura 11.** Información de la zona.

Alta demanda de agua:	<input type="radio"/> Si	<input checked="" type="radio"/> No	
Pozos de inyección:	<input type="radio"/> Si	<input checked="" type="radio"/> No	
Plantas de tratamiento:	<input type="radio"/> Si	<input checked="" type="radio"/> No	
Pozos abandonados:	<input type="radio"/> Si	<input checked="" type="radio"/> No	
Zona no poblada:	<input type="radio"/> Si	<input checked="" type="radio"/> No	
<input type="button" value="Enviar"/>	<input type="button" value="Borrar"/>		

Al terminar esta sección se puede encontrar un botón de borrar, con el cual se inicia nuevamente la herramienta y un botón de enviar para continuar a la siguiente sección.

- **Información de tratamientos disponibles:** Esta sección aparece si el usuario ha seleccionado que si cuenta con plantas de tratamiento disponibles.

Aquí se deben seleccionar los tratamientos disponibles en campo y dar clic en el botón de Aceptar.

**Figura 12.** Información tratamientos disponibles.

The screenshot shows a web interface with a grey header bar containing the title "Listado de tratamientos" in green text. Below the header, the instruction "Por favor seleccione los tratamientos que tenga disponibles" is displayed. There are eight checkboxes arranged in two columns. The first column contains: "Osmosis Inversa", "Recompresión mecánica del vapor (MVR)", "Nanofiltración", and "Evaporación térmica". The second column contains: "Electrodialisis", "Cristalización", "Destilación térmica", and "Ninguna de las anteriores". The "Ninguna de las anteriores" checkbox is checked. Below the checkboxes is a rectangular button labeled "ACEPTAR".

- **Información de tratamiento escogido:** En esta sección la herramienta muestra los tratamientos rankeándolos donde 1 sería el tratamiento recomendado para las condiciones dadas; la forma de rankear los tratamientos se describe en la sección 5.2.2.5. El usuario debe escoger finalmente con cual tratamiento desea trabajar para la toma de decisión final del método de disposición. Esto se hizo con el fin de dar la libertad al usuario de escoger el tratamiento si considera que algún otro tratamiento debería ser usado en el campo. Finalmente se da clic en el botón enviar. Para el desarrollo de esta herramienta se consideran solamente los tratamientos avanzados y no la cadena de tratamiento.

**Figura 13.** Información tratamiento escogido.

## Ranking de tratamientos






El siguiente es un ranking de tratamientos recomendados de acuerdo a las condiciones dadas anteriormente. Por favor seleccione con cuál tratamiento desea trabajar:

- 1. ELECTRODIÁLISIS
- 2. NANOFILTRACIÓN
- 3. OSMOSIS INVERSA
- 4. EVAPORACIÓN TÉRMICA
- 5. DESTILACIÓN TÉRMICA
- 6. MVR
- 7. CRISTALIZACIÓN

Enviar

- **Preguntas adicionales:** En esta sección se hacen otras preguntas relacionadas a la operación, las cuales son muy importantes para el módulo económico y que son solo de conocimiento del usuario de la herramienta. Los datos de costos deben ser dados todos en las mismas unidades para que la respuesta sea válida, es decir, todos el USD o COP. La herramienta muestra valores de referencia tomando datos de Estados Unidos, pero estos deben ser modificados de acuerdo a datos reales del usuario.

**Figura 14.** Preguntas adicionales.

Costo del transporte $\$/(\text{bbl} \cdot \text{km})$ :	<input type="text" value="0.02"/>	
Costo obtención agua fresca por barril:	<input type="text" value="0.25"/>	
Distancia estimada de la fuente al pozo (km):	<input type="text"/>	
Volumen de agua para la operación (bbl):	<input type="text"/>	
Porcentaje Flowback (%):	<input type="text"/>	

*Nota: Es necesario poner en las mismas unidades los costos (USD o COP)*









*Los valores de referencia están en USD*

- **Preguntas relacionadas a los tres métodos de disposición:** En esta sección se hacen preguntas relacionadas a distancias y costos de los tres métodos de disposición propuestos para el desarrollo de la herramienta,

como por ejemplo distancia en la cual se ubicaría el nuevo pozo de inyección, costo de inyectar un barril en esa zona, entre otras. Esta sección está relacionada al módulo económico y las preguntas varían de acuerdo a las respuestas dadas por usuario anteriormente en Información de la zona. Igualmente cuenta con valores de referencia que deben ser modificados, recalcando la importancia de mantener las mismas unidades en los costos.

Las preguntas varían de acuerdo a las respuestas dadas por el usuario y en la figura a continuación se muestra un ejemplo de cuales serían en caso de que no existieran pozos de inyección, pozos abandonados ni plantas de tratamiento.

**Figura 15.** Preguntas métodos de disposición.

Distancia estimada al nuevo pozo de inyección(km):	<input type="text"/>	
Costo CAPEX del pozo de inyección/bbl:	<input type="text"/>	
Costo de inyectar /bbl:	<input type="text"/>	
Distancia estimada a la nueva planta de tratamiento (km):	<input type="text"/>	
Costo CAPEX planta tratamiento/bbl:	<input type="text"/>	
Distancia estimada de la planta de tratamiento al sitio a disposición (km):	<input type="text"/>	
Costo del tratamiento/bbl:	<input type="text"/>	
¿Hay tendencias a Scales?	<input type="radio"/> Si <input checked="" type="radio"/> No	

- **Consideraciones de la herramienta:** En esta sección el usuario debe dar un porcentaje en peso a cada módulo de la herramienta según lo que considere pertinente. La suma de estos tres valores debe ser igual al 100%.

**Figura 16.** Consideraciones de la herramienta.

Ingrese un valor entre 1 y 100 según corresponda para asignar un porcentaje en peso a cada aspecto

Aspectos operacionales (%)\*:

Aspectos ambientales (%)\*:

Aspectos económicos (%)\*:

*Nota: La suma de los tres (3) aspectos debe ser igual a cien por ciento (100%)*

### 5.2.2.2 Módulo factores ambientales.

Considerando que la evaluación de los criterios ambientales generalmente está asociada a opiniones subjetivas, para el desarrollo de esta herramienta y para poder ponderar estos criterios se llevó a cabo la recopilación de diferentes opiniones de expertos. Para esto, se realizó una encuesta a varios expertos en el tema ambiental, buscando conocer la opinión, relacionada a que impacto puede tener un criterio dependiendo del método de disposición a evaluar, el formato de esta encuesta se puede encontrar en el anexo 3.

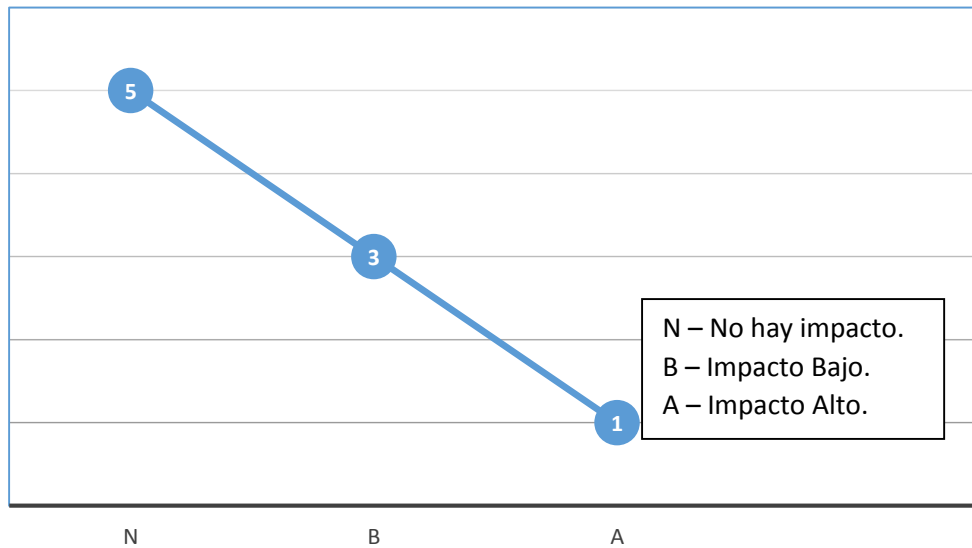
Con el fin de obtener una matriz neutral y objetiva, se realizó la encuesta a personas que tuvieran un punto de vista desde la academia y desde la industria. Se contó con el apoyo de 6 ingenieros de petróleos trabajando en la industria y profesores de la Universidad Industrial de Santander.

Respecto a los criterios, para el caso de demanda del agua y tráfico de camiones se combinó la opinión de los expertos y las consideraciones de la zona para plantear diferentes escenarios, estos escenarios se pueden observar en el anexo 3, para cada uno de los criterios se dio la opción de evaluar si para cada método de disposición se asociaba un impacto ambiental y en qué medida (bajo o alto).

Teniendo en cuenta que estas opiniones son cualitativas, para poder puntuar y poder comparar los diferentes métodos de disposición se llevaron a una escala numérica, de acuerdo al escenario que corresponda a cada opinión, donde 1 hace

referencia a un escenario desfavorable y 5 al escenario más favorable, esta escala de conversión se puede observar en la figura 16.

**Figura 17.** Ponderación de los factores ambientales.



Luego de este proceso se promediaron las diferentes puntuaciones de las opiniones de cada experto, para obtener una única matriz de evaluación y finalmente se multiplicó este valor por el peso de cada criterio, obteniendo una sumatoria y respuesta parcial donde el mayor valor hace referencia a la opción más favorable. La matriz final ambiental de expertos se puede observar en la tabla 9.

**Tabla 9.** Matriz opinión ambiental

<b>OPINIÓN EXPERTOS</b>				
<b>Parámetro</b>	<b>Imp. Criterio</b>	<b>Reciclaje</b>	<b>Reuso</b>	<b>Inyección</b>
<b>Demanda de Agua</b>	100			
Alta		4,4	3,2	4
Moderada		4	3,2	4
Baja		2,4	2,8	2,4
<b>Ciclo Hidrológico</b>	60	4	3	3
<b>Tráfico de camiones</b>	60			
Bajo		3,2	4	2,6
Alto		2,6	3,8	2
<b>Contaminación de aguas</b>	65	3,4	3,8	2,4
<b>Energía consumida</b>	5	1,8	3,4	1,6
<b>Emisiones de GEI</b>	80	1,8	2,6	2
<b>Microsismicidad inducida</b>	85	3,4	4	2,2
<b>Efectos en la salud</b>	70	3	3,8	2,4
<b>Radioactividad</b>	10	1	1	5

**Fuente.** Recopilación opinión de expertos.

### **5.2.2.3 Modulo factores operacionales.**

Para el caso de los factores operacionales, se hicieron una serie de consideraciones basándose en la revisión bibliográfica y la opinión de expertos, en donde se establecieron diferentes escenarios de favorabilidad o des-favorabilidad al momento de aplicar un método de disposición para ciertas condiciones en particular, estas condiciones que determinan la viabilidad operacional de un método de disposición están ligadas a las respuestas dadas por el usuario inicialmente, por ejemplo y tal como se menciona anteriormente en el capítulo 4, un escenario de grandes tasas de recuperación de residuos al inicio de la vida del pozo presenta un panorama más favorable para la aplicabilidad del reuso o el reciclaje, por el contrario un escenario de pequeñas tasas de recuperación durante la vida del pozo se asocia a una

condición operacional desfavorable al momento de aplicar alguno de estos métodos de disposición. <sup>113</sup>

Las consideraciones realizadas están soportadas en la bibliografía, aprobadas y revisadas por dos expertos operaciones en el tema, estas pueden ser observadas en la tabla 10.

**Tabla 10. Consideraciones operacionales**

Criterio	Consideraciones	Escenarios	D: Desfavorable F: Favorable A: Altamente favorable	
		Valoración de Escenarios de favorabilidad		
		Desfavorable= 1	Favorable= 3	Altamente favorable= 5
Capacidad	Capacidad de tratamiento	No hay espacio en campo ni plantas de tratamiento cercanas.	No hay plantas de tratamiento cercanas, sin embargo, hay espacio en campo que permite considerar la instalación de una planta.	Hay una planta de tratamiento cercana que cumple con los requerimientos del operador.
	Capacidad de almacenamiento	Baja capacidad de almacenamiento y espacio en campo limitado.	Baja capacidad de almacenamiento, pero con espacio disponible para instalar nuevas facilidades.	Buena capacidad de almacenamiento de residuos en el campo.
	Capacidad pozos inyectores	No disponibilidad de pozos inyectores o pozos abandonados para reconversión.	No disponibilidad de pozos inyectores, pero pozos abandonados para reconversión disponibles.	Existen pozos inyectores con capacidad de disposición en la zona.
Disponibilidad de agua/Demanda de agua	Ayuda a disminuir la demanda de agua	No aplica	Baja demanda de agua en la zona o alta disponibilidad de agua.	Alta demanda de agua en la zona y baja disponibilidad de agua en la zona.
	Ayuda a disminuir la demanda de agua por parte de la industria	No aplica	Campo sin problemas de disponibilidad de agua.	Baja disponibilidad de agua en la zona para futuras operaciones.
	No ayuda a disminuir la demanda de agua	Alta demanda de agua en la zona o baja disponibilidad de agua en la zona.	Baja demanda de agua en la zona y alta disponibilidad para futuras operaciones.	No aplica
Criterio	Consideraciones	Escenarios	D: Desfavorable F: Favorable A: Altamente favorable	

<sup>113</sup> MANTELL, M. Op. cit.

		Valoración de Escenarios de favorabilidad		
		Desfavorable = 1	Favorable= 3	Altamente favorable= 5
Calidad del Agua	Mayor grado de tratamiento según requerimiento	Aplicar tratamiento terciario.	Aplicar tratamiento secundario.	Aplicar solamente tratamiento primario.
	Usar como nuevo fluido de fractura, se debe tener en cuenta la reformulación química	Aplicar tratamiento terciario.	Aplicar tratamiento secundario.	Aplicar solamente tratamiento primario o pretratamiento para reconversión del agua.
	No se ve afectado generalmente	No aplica	Aguas con niveles de contaminantes que pueden ser económicamente viables tratar.	Aguas con altos niveles de contaminantes son candidatas a este método de disposición. (Altas concentraciones de TDS pueden ser inviables económicamente de tratar).
Agua Recuperada	Grandes tasas iniciales o pequeñas tasas	Pequeñas tasas de recuperación a lo largo de la vida del pozo.	No aplica	Grandes tasas de recuperación inicial.
	Grandes tasas iniciales o pequeñas tasas	Pequeñas tasas de recuperación a lo largo de la vida del pozo.	No aplica	Grandes tasas de recuperación inicial.
	Indiferente	No aplica	Grandes tasas de recuperación inicial.	Pequeñas tasas de recuperación a lo largo de la vida del pozo.
Acceso de tráfico	Tráfico depende del sector al que se distribuya el agua	Largos trayectos de transporte y acceso al tráfico limitado.	Largos trayectos de transporte y buen estado de las vías.	Trayectos cortos para el tratamiento de agua y buen estado de las vías para la distribución del agua.
	Tráfico depende de la disponibilidad de tratamiento en campo.	Largos trayectos de transporte y acceso al tráfico limitado.	Largos trayectos de transporte y buen estado de las vías.	Trayectos cortos para el tratamiento de agua o planta móvil en el campo.
	Depende de la existencia de pozos de inyección cercanos.	Largos trayectos de transporte y acceso al tráfico limitado.	Largos trayectos de transporte y buen estado de las vías.	Trayectos cortos en la cadena del agua.
<b>Criterio</b>	<b>Consideraciones</b>	<b>Escenarios</b>	<b>D: Desfavorable F: Favorable A: Altamente favorable</b>	

		Valoración de Escenarios de favorabilidad		
		Desfavorable = 1	Favorable= 3	Altamente favorable= 5
Energía Disponible	Altos requerimiento dependiendo del tratamiento	Energía en el campo insuficiente y costoso.	Buen suministro de energía en el campo.	Excelente suministro de energía en el campo.
	Generalmente menor requerimiento que reciclaje, depende del tratamiento.	Energía en el campo insuficiente y costoso.	Buen suministro de energía en el campo.	Excelente suministro de energía en el campo.
	Indiferente	No aplica	Buen suministro de energía en el campo.	Energía en el campo insuficiente y costoso.
Reciclaje				
Reuso				
Inyección				
Reciclaje/Reuso				

Con el fin de mantener la misma escala de evaluación utilizada para ponderar los criterios ambientales, se optó por dar un puntaje a cada variable a partir de la favorabilidad de aplicar el método de disposición de acuerdo a una serie de condiciones que varían de acuerdo a la respuesta del usuario, en donde las condiciones del campo o de la zona determinan que tan favorable puede ser operacionalmente cada método de disposición. Al igual que para el caso ambiental 5 representa un escenario altamente favorable y 1 hace referencia a un escenario desfavorable para aplicar el método de disposición.

Luego de puntuar cada criterio operacional para cada método de disposición, se ponderaron los criterios multiplicando estos resultados con el peso de cada criterio para tomar la decisión. Teniendo en cuenta que determinar el peso de cada criterio depende de una opinión subjetiva y puede variar de una persona a otra, se realizó una encuesta a dos diferentes expertos y al igual que para los factores ambientales, estos valores se promediaron con el fin de dar un peso a cada criterio y los datos son presentados en la tabla 11.

**Tabla 11.** Peso de importancia criterios operacionales

Criterio	Importancia	Explicación Criterio.
	0: No relevante 100: Muy importante	
Capacidad	90	Hace referencia a la capacidad de las facilidades o locaciones necesarias para cada método de disposición, es decir la capacidad de tratamiento, almacenamiento o capacidad de pozos inyectores.
Disponibilidad de agua	80	Hace referencia a la importancia de la disponibilidad de agua en la zona para una futura operación de fractura al momento de elegir un método de disposición.
Calidad del Agua	90	Hace referencia a en qué grado afecta la calidad de agua y el nivel de tratamiento de aguas a utilizar al momento de elegir el método de disposición.
Agua Recuperada	60	Hace referencia a la relevancia que tiene considerar grandes tasas de recuperación inicial o pequeñas tasas de recuperación durante la vida del pozo para elegir un método de disposición.
Acceso de tráfico	60	Hace referencia a la importancia de considerar el transporte de aguas, estado de las vías en la zona y cercanía a los puntos de disposición.
Energía Disponible	90	Hace referencia a la importancia de los recursos energéticos con los que se cuentan en la zona, por ejemplo, para el uso de tratamientos avanzados se deben considerar altos requerimientos energéticos.

Finalmente, se realiza la sumatoria de los resultados de la ponderación para cada método de disposición, en donde el mayor puntaje representa el método de

disposición más favorable operacionalmente para aplicar en el pozo.

#### **5.2.2.4 Modulo económico.**

Al momento de elegir el mejor método de disposición es fundamental comparar económicamente los métodos entre sí, para esto es necesario identificar los costos asociados a cada método de disposición para estimar la diferencia entre un método y el otro, tal como se había mencionado en el capítulo 4, los costos más importantes son: el transporte, adquisición del agua y costos operacionales directos de cada método de disposición, es decir, costos de tratamiento, costos de inyección o costo de reconversión del agua.

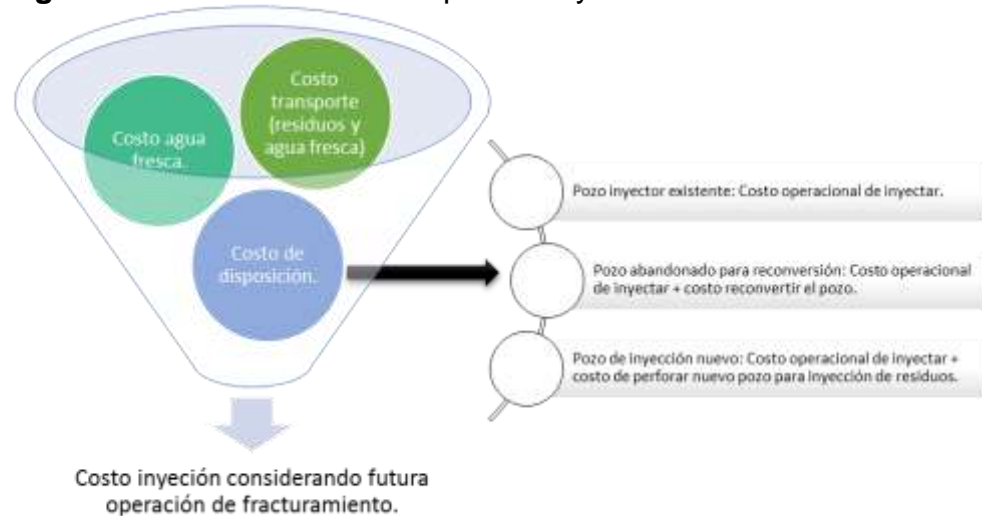
Para la totalización de estos costos la herramienta se basa en una serie de valores de referencia de Estados Unidos, sin embargo, debido a que los costos pueden variar entre una zona y otra, y con el fin de obtener un valor representativo, en la herramienta se pregunta al usuario una serie de datos adicionales que permitirán completar el modulo económico, estas preguntas hacen referencia a los costos del agua, costos de transporte, de tratamiento, inyección, reconversión de agua y distancias. A pesar de que los valores de referencia permiten el funcionamiento de la herramienta, se recomienda al usuario cambiar estos por valores reales de la zona de operación.

Para el análisis económico de la herramienta se consideraron los diferentes escenarios económicos que se podrían presentar en cada caso, es decir, los diferentes costos que se deberían considerar según sea el caso en cada campo. Además, basándose en diferentes papers de evaluaciones económicas de los diferentes métodos de disposición en Estados Unidos, se tiene en cuenta el costo del agua fresca para una futura operación, debido a que, si bien es cierto que no es un costo que afecta directamente la operación actual, en la cadena del agua, al considerar el agua como un subproducto la recuperación de esta agua

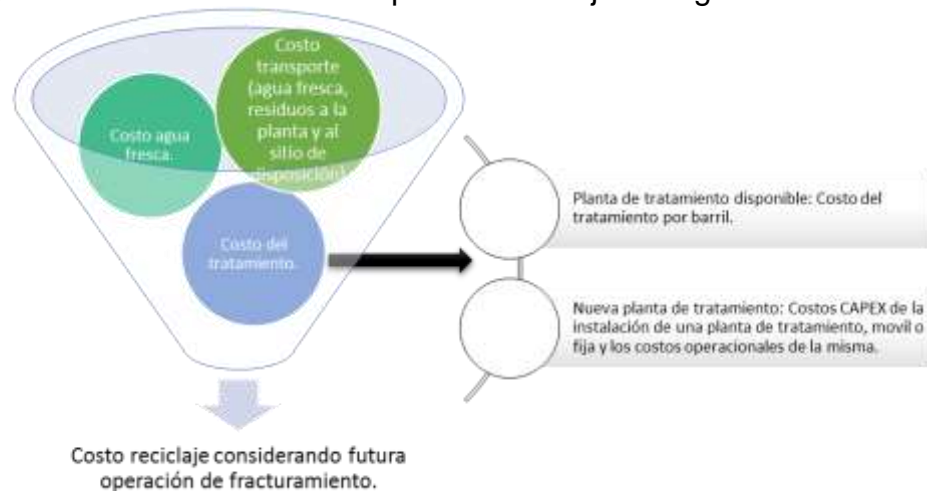
(para el caso del reuso) disminuirá estos costos asociados a la adquisición del agua para el proyecto.

En las figuras 17, 18 y 19 se muestran los escenarios y costos considerados para la evaluación económica de los tres diferentes métodos de disposición.

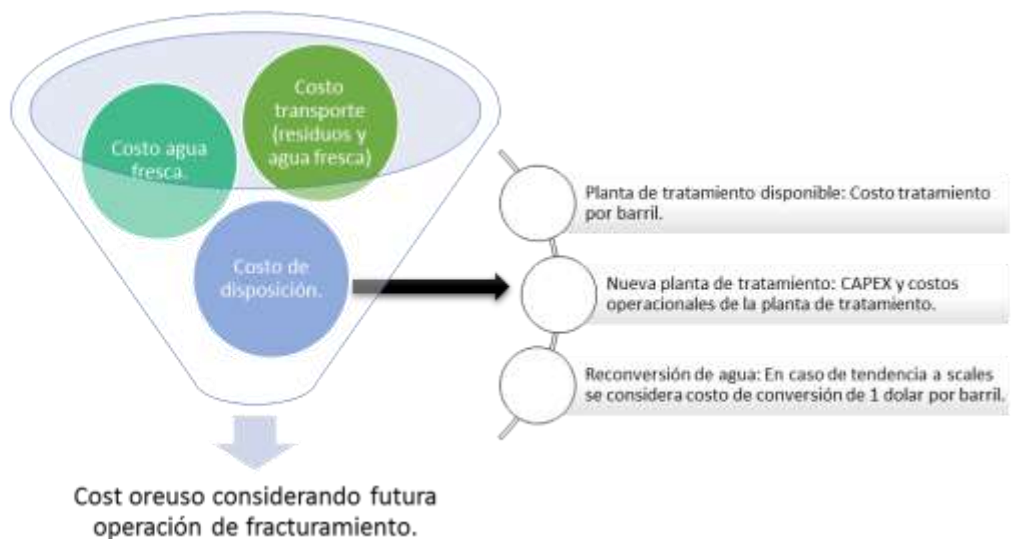
**Figura 18.** Escenarios costos para la inyección de residuos.



**Figura 19.** Escenarios costos para el reciclaje del agua residual.



**Figura 20.** Escenario costo para el reuso del agua residual.



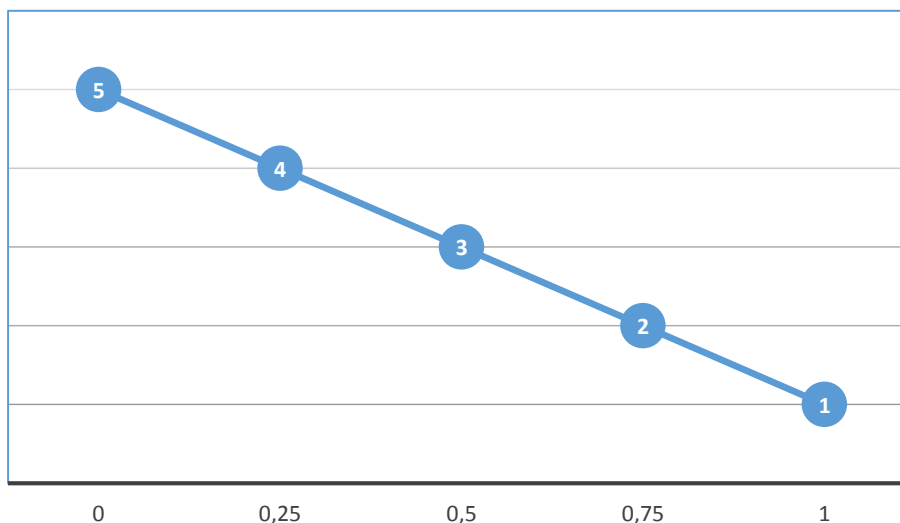
Luego de totalizar los costos, estos resultados se deben normalizar con el fin de tener estos valores en la misma escala de evaluación utilizada en los módulos ambiental y operacional, para esta normalización se compararon los 3 resultados entre sí, siguiendo la siguiente formula.

$$N1 = C1 / (C1+C2+C3)$$

Donde N es el valor normalizado del método de disposición y C1, C2 y C3 hace referencia a los métodos de disposición.

Después de tener el valor normalizado, este se lleva a la misma escala de ponderación basada en la favorabilidad de cada método, este valor normalizado puede estar entre 0 y 1, y a medida que el valor normalizado sea menor en comparativa con los otros significa que su costo total es menor, es decir que a medida que el valor normalizado se acerque a 0 mejor será su favorabilidad, este proceso de normalización se puede observar en la figura 20.

**Figura 21.** Normalización de los costos.



Para dar un valor exacto de puntaje de acuerdo al dato normalizado, se interpolaron los datos a partir de una regresión lineal.

#### **5.2.2.5 Modulo tratamientos.**

Dada la importancia del tratamiento de aguas en el manejo de aguas residuales, se desarrolló un módulo de tratamientos que busca rankear algunos tratamientos avanzados, esto con el fin de dar apoyo al módulo operacional y económico debido a que ambos se ven afectados por el tipo de tratamiento a utilizar y a la disponibilidad del tratamiento en el campo o en la zona, los tratamientos seleccionados se basan en la revisión bibliográfica.

Para aplicar un tratamiento avanzado, se requiere de una cadena de tratamiento previa, en la cual se asocian una serie de tratamientos primarios y secundarios, debido a que la aplicabilidad de estos tratamientos se ve limitada por la calidad del afluente, sin embargo, para efectos de este proyecto solo se considera la instalación o aplicación de un tratamiento avanzado, no porque este sea el único tratamiento necesario, sino porque se asume que las facilidades en campo asociadas a este

tratamiento previo ya se han considerado para el desarrollo del proyecto, teniendo en cuenta que son facilidades de superficie que generalmente se encuentran en campo.

En primera instancia se parte de analizar si para cada método de disposición se requiere tratamiento avanzado, tal como se mencionó anteriormente, para el desarrollo de esta herramienta solo se consideró trabajar con tratamientos avanzados debido a que son los que más afectan el proceso de decisión, sin embargo, se debe tener en cuenta que algunos de ellos requieren tratamientos primarios o secundarios. Para el caso de inyección la literatura sugiere que no es necesario aplicar un tratamiento avanzado a estas aguas debido a que los requerimientos de calidad de agua en este método de disposición no son elevados, para el caso de reuso se parte de analizar principalmente los niveles de TDS, en el anexo 2 se puede observar que para un fluido de fractura se requiere que el agua tenga menos de 40.000 partes por millón de TDS<sup>114</sup>, es decir para aguas con una contaminación mayor se considera necesario un tratamiento avanzado y para aguas con una contaminación menor se requiere un proceso de reconversión de agua que puede ser un proceso de mezcla de agua contaminada con agua fresca<sup>115</sup>, mientras que para el reciclaje se toma como referencia el valor de la resolución 0631 de 2015 que fija los niveles de TDS permisibles en 1200 partes por millón.

Luego de determinar si se requiere o no un tratamiento avanzado a partir de la literatura se limitan los tratamientos de acuerdo a la concentración de TDS que pueden tratar y se rankean de acuerdo a su costo, además en escenarios de baja disponibilidad de agua o alta demanda de agua en la zona, se considera el porcentaje de recuperación de agua que tienen los tratamientos y en zonas con

---

<sup>114</sup> GEORGE, E et al. Hydraulic Fracturing 101: What every representative, environmentalist, regulator, reporter, investor, University researcher, neighbor and engineer should know about estimating frac risk and improving frac performance in unconventional gas and Oil Wells. Society of petroleum engineers. 2012

<sup>115</sup> MANTELL, M. Op. cit.

problemas de acceso a energía se considera el consumo energético de cada tratamiento, además se considera la viabilidad técnica de cada uno de los tratamientos. Para el caso de osmosis inversa y MVR se considera que los niveles de orgánicos deben ser bajos. La recopilación de la información de los tratamientos se puede observar en la tabla 12.

**Tabla 12.** Tratamientos avanzados.

Tecnología	Eficiencia de remoción	Límite tratamiento (mg/l)	Costo (USD/bbl)	% Recuperación	Energía consumida	Viabilidad técnica.
Nanofiltración	98% <sup>3</sup>	35000 <sup>2</sup>	3 <sup>10</sup>	75% <sup>3</sup>	2 KWh/gal (0.08 KWh/bbl) <sup>11</sup>	Baja <sup>3</sup>
Electrodialisis	95% <sup>4</sup>	40000 <sup>4</sup>	3,5 <sup>10</sup>	92% <sup>5</sup>	0,4 KWh/bbl <sup>4</sup>	Excelente <sup>3</sup>
Evaporación térmica	99% <sup>4</sup>	100000 <sup>4</sup>	4 <sup>10</sup>	75% <sup>7</sup>	60 KWh/gal <sup>11</sup>	Excelente <sup>3</sup>
Cristalización	99% <sup>4</sup>	300000 <sup>4</sup>	10,5 <sup>10</sup>	95% <sup>6</sup>	10-13 KWh/bbl <sup>4</sup>	Buena <sup>3</sup>
Osmosis inversa	99% <sup>1</sup>	65000 <sup>2</sup>	2 <sup>10</sup>	50% <sup>1</sup>	11-16 KWh/gal (0,67 KWh/bbl) <sup>11</sup>	Excelente <sup>3</sup>
Recompresión mecánica de vapor	93% <sup>9</sup>	200000 <sup>8</sup>	4 <sup>10</sup>	70% <sup>8</sup>	30 KWh/gal (1.3 KWh/bbl) <sup>11</sup>	Excelente <sup>3</sup>
Destilación	98% <sup>5</sup>	250000 <sup>4</sup>	9 <sup>10</sup>	98% <sup>5</sup>	6-7 KWh/bbl <sup>4</sup>	Buena <sup>3</sup>

**Fuente:**

1. All Consulting, «All Consulting.com» [En línea]. Disponible: <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ReverseOsmosisFactSheet.pdf>.
2. Pierce D. 2010.
3. RPSEA. 2009.
4. R. Hammer y J. VanBriesen, «NRDC.org,» 2012. [En línea]. Available: <http://www.nrdc.org/energy/files/Fracking-Wastewater-FullReport.pdf>.
5. Hayes T. 2004
6. All Consulting, «All Consulting.com» [En línea]. Disponible:<http://www.all-llc.com/publicdownloads/CrystallizationFactSheet.pdf>
7. Gaudip A. 2008
8. Alleman D. 2010
9. «National Energy Technology Laboratory,» [En línea]. Disponible: <http://www.netl.doe.gov/technologies/PWMIS/techdesc/index.html>.
10. RYAN, L. Coal Seam Gas Water Management Considerations. Halliburton. SPE presentation. 2011
11. DREWES, O. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. Technical assessment of produced water treatment technologies. RPSEA. 2011.

Para el caso del costo, porcentaje de recuperación y energía consumida, según sea el caso se rankean los tratamientos de mayor a menor, asignando 7 puntos al mejor tratamiento en cada concepto y 1 punto al peor, en caso de tener en cuenta los 3 factores, estos 3 puntajes se suman, para el caso de viabilidad técnica se suma o resta un punto de acuerdo sea el caso, si la viabilidad técnica es muy buena se adiciona un punto, en caso de ser regular se resta un punto y en caso de ser buena no sugiere ningún cambio. Esta viabilidad técnica hace referencia al desarrollo y uso del tratamiento para la industria petrolera y uso para las aguas de fracking, para el caso de MVR y osmosis inversa en caso de verse afectados por la presencia de orgánicos se quitará un punto, esta ponderación sencilla se hace con el fin de ofrecer al usuario una guía del tratamiento a utilizar, donde lo más importante es la limitación del tratamiento según la concentración de TDS, por esto este modulo trabaja de manera independiente y da libertad al usuario sobre cual tratamiento escoger.

#### **5.2.2.6 Respuesta de la herramienta.**

Luego de obtener un resultado parcial para cada módulo (ambiental, operacional y económico) al usuario se le pregunta qué porcentaje de importancia o peso le quiere dar a cada aspecto, en donde la suma de los tres debe ser igual a 100, por ejemplo, si un usuario desea priorizar la parte económica puede evaluar los métodos y asignar un 50% al aspecto económico y repartir el 50% restante entre los otros dos aspectos.

Finalmente, cada resultado parcial se multiplicará por el peso asignado por el usuario con el fin de obtener un resultado final, a partir del valor de este resultado final la herramienta mostrara el método de disposición más adecuado para trabajar y una serie de recomendaciones que se deben tener en cuenta para cada método en particular basados en la teoría recopilada.

## **5.3 PROGRAMACIÓN DE LA HERRAMIENTA**

Luego de tener establecido el proceso a seguir para la toma de decisiones que seguirá la herramienta, se procede a programar un software de fácil uso y aplicación sencilla. Para esto se requiere de un lenguaje de programación o un programa que permita preguntar y almacenar datos para realizar una serie de operaciones con los mismos.

### **5.3.1 LENGUAJE DE PROGRAMACIÓN**

Inicialmente el código de programación se plasmo es un diagrama de flujo o dfd, con el fin de mostrar paso a paso el proceso lógico de la herramienta. Además, este fue el proceso inicial para el desarrollo de la herramienta previó a plasmar el código en algún lenguaje de programación. Los diagramas de flujo de la herramienta se muestran en el anexo 4.

C++ es un lenguaje de programación que tiene infinidad de usos en programación, desde sistemas operativos y compiladores hasta aplicaciones de bases de datos y procesadores de texto, pasando por juegos, aplicaciones a medida, etc., por lo cual se decidió basarse en este para la programación de la herramienta.

Debido a la estética de la herramienta y a la necesidad de hacerla sencilla y trabajable a la hora de usarse, se decidió plasmar este lenguaje de programación en HTML, la cual a su vez permite subir la herramienta a la web y hacerla de acceso público. Fue necesario combinar HTML con PHP para poder usar a variables matemáticas y variantes.

Al decidir usar PHP garantizamos que la herramienta tenga una mayor estabilidad y velocidad de respuesta, además que el lenguaje de programación sea sencillo de

entender debido a que se basa en C++ y finalmente que sea fácil de manejar por el usuario.<sup>116</sup>

El servidor APACHE permite montar la herramienta y ejecutarla, por lo cual debe ser instalado en cada computador donde desee usarse (se pueden usar otros servidores web). Existe la opción de usar un servidor local, la cual haría la herramienta de acceso público mediante un link como una página web, pero la adquisición de este está fuera del alcance de esta tesis.

---

<sup>116</sup> ¿Por qué elegir PHP? <En Línea>. Disponible en: [http://programacion.net/articulo/por\\_que\\_elegir\\_php\\_14343](http://programacion.net/articulo/por_que_elegir_php_14343). [Último acceso 07 10 16].

## 6. CONCLUSIONES

- Teniendo en cuenta que las aguas de producción y flowback son el residuo más importante y representativo en el desarrollo de YNC, es fundamental establecer una cadena logística del agua que logre la mejor rentabilidad económica de la operación (factores económicos), con los menores problemas operacionales (factores operacionales) y que busque un desarrollo sostenible del proyecto (factores ambientales).
- La selección del método de disposición de aguas más apropiado para un proyecto varía de acuerdo a las características propias del mismo, ya que éstas afectan directamente los diferentes factores asociados a la toma de decisión. Por esto es importante el uso de datos fiables para evitar resultados inexactos o erróneos.
- Debido a que la toma de decisiones en temas de manejo de recursos hídricos generalmente se basa en una opinión subjetiva basada en la experiencia del equipo de trabajo o en la comparativa económica del proyecto, es importante contar con la opinión de varios expertos para lograr integrar todos los factores que puedan estar asociados a la toma de una decisión.
- Generalmente elegir un método de disposición se basa en la evaluación económica de las diferentes opciones y cada una de estas puede ser aplicado casi para cualquier campo sin mayores complicaciones, sin embargo, considerar los factores operacionales y ambientales permiten definir cuál de ellos es el más apropiado de acuerdo a las necesidades del operador.
- Para elegir el método de disposición durante el desarrollo de un proyecto de YNC, esta herramienta ofrece una alternativa interesante de orientación, ya

que permite determinar, a partir de la información básica de un campo, de forma rápida y sencilla, el método de disposición más apropiado según las características de la zona, integrando factores ambientales, operacionales y económicos. Esto es posible gracias a la recopilación, investigación y análisis de las diferentes opciones que han sido aplicadas internacionalmente y se pueden adaptar y aplicar para Colombia.

- En Estados Unidos, la inyección de residuos ha sido la práctica más utilizada para la disposición de residuos líquidos durante el desarrollo de YNC, sin embargo, el reciclaje y el reuso han empezado a ser opciones interesantes gracias al análisis integral (económico, operacional y económico) al momento de tomar una decisión, esto se ve reflejado en el aumento de los porcentajes de agua reutilizada en los diferentes shales en este país.
- Es importante resaltar que esta herramienta es una alternativa de orientación para la toma de decisión sobre el método de disposición de aguas en YNC, que debe validarse con la experiencia y conocimientos de los ingenieros, es decir, que el resultado obtenido debe ser usado simplemente como soporte y debe ser analizado para verificar su coherencia.
- La disponibilidad y viabilidad del tratamiento de aguas es un factor fundamental en el manejo de aguas residuales, ya que este determinará la posibilidad de reciclar o reusar estos residuos, por esto, en la herramienta se incluye un módulo de tratamientos sencillo que busca orientar al usuario, sin embargo, este módulo solo considera los tratamientos avanzados y se debe evaluar la cadena de tratamientos previa estos. Además, se debe tener en cuenta que esta es una temática compleja y la toma de esta decisión requiere un análisis a fondo de las diferentes opciones de tratamiento y limitaciones que se puedan tener, tales como el acceso a la tecnología o que se cumplan los requerimientos de calidad de agua de acuerdo a la formación.

## **7. RECOMENDACIONES**

- Si bien es cierto que la herramienta contempla un módulo de tratamiento para escoger el que más se adapte a la situación expuesta por el usuario, este módulo debe ser ampliado y profundizado con el fin de contar con un mayor número de tratamientos para realizar el análisis correspondiente. Se

recomienda modificar este módulo por uno que contemple la evaluación de la cadena de tratamientos completo, desde las facilidades de separación hasta las plantas de tratamiento avanzado.

- Es necesaria una normativa o manual de operaciones que contemple el reciclaje de aguas residuales para diferentes sectores productivos en el país, es decir que defina parámetros de calidad a los cuales las aguas residuales deberían llegar para cada sector en particular, como ocurre en Estados Unidos, de esta manera la herramienta debería ser actualizada y modificada en torno al reciclaje.
- A parte del reuso de aguas residuales para continuar con la operación de yacimientos no convencionales, esta se puede reusar para otras operaciones en campo como lo es el recobro mejorado u otras operaciones asociadas a yacimientos convencionales. Estas alternativas podrían ser consideradas en un futuro en la herramienta.
- Como los datos para la evaluación de las opciones afectan de manera significativa la fiabilidad de los resultados de la evaluación, se recomienda, realizar periódicamente la actualización de la información reportada en la literatura, con el fin de contar con la información más reciente.
- Se recomienda acudir a más expertos en el tema operacional y ambiental para complementar los valores asignados a cada criterio, con el fin de que los pesos y las puntuaciones permitan obtener los mejores resultados. Además, se recomienda aplicar un análisis estadístico a estas opiniones con el fin de discretizar opiniones con alta desviación estándar.

## **BIBLIOGRAFÍA**

<<Lime soda ash softening>> [En línea]. Disponible en: [http://water.me.vccs.edu/exam\\_prep/limesodaash.htm](http://water.me.vccs.edu/exam_prep/limesodaash.htm). [Último acceso: 07 10 16].

¿Por qué elegir PHP? <En Línea>. Disponible en: [http://programacion.net/articulo/por\\_que\\_elegir\\_php\\_14343](http://programacion.net/articulo/por_que_elegir_php_14343). [Último acceso 07 10 16].

<<Techical Note. Nanofiltration Treatment of MIEX® Process Waste>> [En línea]. Disponible en: [http://www.miexresin.com/files/pdfs/TechNote\\_Waste\\_Treatment-NF\\_V0508.pdf](http://www.miexresin.com/files/pdfs/TechNote_Waste_Treatment-NF_V0508.pdf). [Último acceso: 01 07 16].

<<Tratamiento biológico de aguas residuales y desechos orgánicos>> [En línea]. Disponible en: <https://aguasresiduales.wordpress.com/2008/05/30/tratamiento-biologico-de-aguas-residuales>. [Último acceso: 07 10 16].

ABSI, F et al. Pilot plant investigation of ozone disinfection of physicochemically treated municipal wastewater. McGill University.

AISSA W. Preliminary design and cost estimation of waste water treatment unit. Mechanical Power Department, High Institute of Energy, Aswan, Egypt. 2008.

ALL CONSULTING, <<All Consulting.com>> [En línea]. Disponible: <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ReverseOsmosisFactSheet.pdf>. [Último acceso: 07 10 16].

ALL CONSULTING, <<All Consulting.com>> [En línea]. Disponible: <http://www.all-llc.com/publicdownloads/ThermalDisillationFactSheett.pdf>. [Último acceso: 07 10 16].

ALLEMAN, D. Considerations for treating water associated with shale gas development. All Consulting. 2010.

ANLA, Ministerio de ambiente y desarrollo sostenible. Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental proyectos de perforación exploratoria de hidrocarburos. 2014.

BLAUCH, M. Marcellus Shale Post-Frac Flowback Waters - Where is all the salt coming from and what are the implications? Superior Well Services Inc. Society of Petroleum Engineers. 2009

COMIMSA, Corporación Mexicana de investigación en materiales. La extracción de gas no convencional y la fractura hidráulica, permisos en burgos. Asamblea contra la Fractura Hidráulica. 2011.

CRETIU, C., et al. Challenging wastewater treatment. Society of Petroleum Engineers. 2012.

DAHM K., GUERRA K. Produce water reuse case studies. Presentation at EUCI: produced water management in the west conference. 2014.

DALE, A. Water Recycling helps with sustainability. Brandt NOV Global. Society of Petroleum Engineers. 2010.

DIAZ, S. Riesgos asociados a la radioactividad natural en los proyectos de extracción de gas no convencional. Congreso nacional del medio ambiente. 2014.

DORAN, G., & LEONG, L. Developing a Cost Effective Solution for Produced Water and Creating a 'New' Water Resource. United States Department of Energy, National Energy Technology Laboratory DOE/MT/95008-4. 2000.

DOWNING, B. Will Ohio start accepting drilling brine at 40 landfills? 2013.

DUTZIK, T., RIDLINGTON, E. The costs of fracking: The price tag of dirty drilling's environmental damage. Frontier Group. 2012

EIA/ARI World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment. IV. Northern South America. Advance Resource International. 2013.

EPA US Environmental Protection Agency, <<General Information about Injection Wells>> [En línea]. Disponible en:

[http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/basicinformation.cfm#what\\_is](http://water.epa.gov/type/groundwater/uic/basicinformation.cfm#what_is). [Último acceso: 07 10 16].

ESTRADA, J. Desarrollo del gas lutita (shale gas) y su impacto en el mercado energético de México: reflexiones para Centroamérica. Naciones Unidas. 2013.

GAUCHER, E. Toxic Metals in Shales: Questions and Methods for a Better Management of Flow-Back Waters. Society of petroleum engineers. 2014.

GAUDLIP, A. Marcellus shale water management challenges in Pennsylvania. Society of Petroleum Engineers, Range Resources Appalachia LLC. 2008.

GE Power and Water. Flowback & Produced water treatment overview. General Electric Company. 2012.

GEORGE, E et al. Hydraulic Fracturing 101: What every representative, environmentalist, regulator, reporter, investor, University researcher, neighbor and engineer should know about estimating frac risk and improving frac performance in unconventional gas and Oil Wells. Society of petroleum engineers. 2012.

HAJKOWICZ S., HIGGINS A. A comparison of multiple criteria analysis techniques for water resource management. European Journal of Operational Research. 2008. Pág 255–265.

HANSEN, E et al. Water Resource Reporting and Water Footprint from Marcellus Shale Development in West Virginia and Pennsylvania. Earthworks Oil & Gas Accountability Project, 2013.

HAYES T. Characterization of Marcellus shale and Barnett shale flowback waters and technology development for water reuse. Gas Technology Institute. 2010.

HAYES, T., et al. Mechanical vapor recompression for the treatment of shale gas flowback water. Society Petroleum Engineering. 2014.

HAYES T. Overview of emerging produced water treatment technologies. Gas Technology Institute. 2004.

HORNER, P., et al. Shale gas water treatment value chain- A review of technologies, including case studies. Society of Petroleum Engineers. 2011.

HUMBOLDT de México, <<¿Qué es destilación?>> [En línea]. Disponible en: <http://www.humboldt-demexico.com/datos/webs/glosario/destilac.htm>. [Último acceso: 07 10 16].

HURTADO, T., BRUNO, G. El Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) como Herramienta para la toma de Decisiones en la Selección de Proveedores. Tesis. UNMSM.

HUSSAIN, A., et al. Advanced technologies for produced water treatment. Conoco Philips. OTC 24749. 2014.

iWATER, <<Filtros de lecho profundo (zeolita o multimedia: arena, grava y antracita)>> [En línea]. Disponible en: <http://www.pds.org.pe/productos/filtros-de-lecho-profundo-zeolita-o-multimedia-arena-grava-y-antracita/>. [Último acceso 07 10 16].

JAIMES, D. & PICO, M. Diseño de la planta de tratamiento de aguas residuales y de producción evaluando las diferentes alternativas nacionales y extranjeras- Aplicación campo colocado. Universidad Industrial de Santander. Tesis. 2009.

KIRANKUMAR, V, et al. The applicability of UV/Oxidation technologies to treat contaminated groundwater. American Institute of Chemical Engineers. 1993

LOPEZ, E. El abecé de los hidrocarburos en reservorios no convencionales: Shale oil, shale gas, tight gas. Tercera edición. Instituto Argentino del petróleo y gas.2013.

MADDEN, B., VOSSOUGH, S. US Shale gas and tight Boom- The opportunities and Risks for America. Society of Petroleum Engineers. 2013.

MADRIMASD, <<Tratamiento del agua residual industrial de una papelería mediante ozonación>> [En línea]. Disponible en: <http://www.madrimasd.org/blogs/remtavares/2011/03/08/131573>. [Último acceso: 07 10 16].

MANTELL M. Produced water reuse and recycling challenges and opportunities across major shale plays. Chesapeake Energy Corporation. 2011.

MCMANUS, K., et al. A sustainable choice for water treatment/recycling when injection is not an option or water supply is limited. Eureka Resources. Society of Petroleum Engineers. 2015.

MIDDAUGH, M., et al. A new view of produced water: Resource, not waste. ENVIRON. Society of Petroleum Engineers. 2015.

MINGAZETDINOV, I. Predictions of produced water quality and quantity for spatially-distributed wells in Niobrara Formation. Tesis de Maestría. Colorado State University. 2012.

MOFARRAH, A. Decision making tool for produced water management: an application of multicriteria decision making approach. Universidad de Newfoundland. 2008.

MONROE, S., et al. Water worth waiting for: Smart water management reduces environmental impact. Baker Hughes. Society of Petroleum Engineers. 2014

NATHANSON, R, et al. The Practical Use of Ozone for the Well Water Application. Ozone Pure Water Inc. 2012.

NATIONAL PETROLEUM COUNCIL. Management of Produced Water from Oil and Gas Wells. 2011.

NYSDEC, New York State department of environmental conservation. Draft SGEIS on the Oil, Gas and Solution Mining Regulatory Program. 2009.

OLAWOYIN, R., WANG, J., OYEWOLE, S. Environmental safety assessment of drilling operations in the Marcellus-Shale gas development. Society of Petroleum Engineers. 2012.

OLSON, D., et al. Smart water management as part of supply chain logistics for source rock. IBM. Society of Petroleum Engineers. 2013.

OWLEN, L., et al. Marcellus Shale water management challenges in Pennsylvania. Range Resources Corp. Society of Petroleum Engineers. 2008.

PAKTINAT, J., et al. Case Studies: Impact of high salt tolerant friction reducers on fresh water conservation in Canadian shale fracturing treatments Society of Petroleum Engineers. 2011.

PAUGH, L. Marcellus shale water management challenges in Pennsylvania. Society of Petroleum Engineers. 2008.

PIERCE D et al. Water recycling helps with sustainability. Society of Petroleum Engineers. 2010.

PROMIGAS. Informe del sector gas natural 2012 XIV edición. 2012.

PROSEP. Hydrocyclones. 2014. Disponible en: <http://prosep.com/solutions/water/primary-separation/hydrocyclone/>. [Último acceso 07 10 16].

RAMNATH, K., DYAN, S. Implementing waste management strategies. Petroltrin. Society of Petroleum Engineers. 2001.

RETEMA, Revista técnica de medio ambiente. Planta de tratamiento de efluentes de la refinería de Cartagena. Edición 167. 2013. Pág 75.

RPSEA. An Integrated Framework for Treatment and Management of Produced Water. Technical assessment of produced water treatment technologies. Primera Edición. Escuela de Minas de Colorado. 2009

RYAN, L. Coal Seam Gas Water Management Considerations. Halliburton. SPE presentation. 2011.

SARMIENTO, L. Hidrocarburos no convencionales: Viabilidad y pertinencia operativa. Naturgas. 2015. Disponible en: [//www.naturgas.com.co/uploads/congreso/2015/memorias/luz\\_helena\\_sarmiento\\_naturgas\\_2015.pdf](http://www.naturgas.com.co/uploads/congreso/2015/memorias/luz_helena_sarmiento_naturgas_2015.pdf).

SCOTT, J. Eagle Ford water recycling thrives following change in Texas Railroad Commission rules. Baker & Hostetler LLP Houston. UOGR Digital Magazine. 2014.

SEDILTRA, <<Filtros de arena y carbón activo>> [En línea]. Disponible en: <http://www.sefiltra.com/filtros-de-arena.php>. [Último acceso 07 10 16].

SETH, K., et al. Maximizing flowback reuse and reducing freshwater demand: Case Studies from the challenging Marcellus Shale. Society of Petroleum Engineers. 2013.

SHARON, O., DVORAK, V. Drinking water treatment: Water softening (Iron exchange). University of Nebraska. 2014.

SLUTZ, J., et al. Key Shale Gas Water Management Strategies: An Economic Assessment. Society of Petroleum Engineers. 2012.

STARK, M., et al. Water and Shale gas development: Leveraging the US experience in new shale developments. Accenture. 2012.

TAYLOR, T. Demonstrating social responsibility in water management decisions. Golder Associates. URTeC: 1922591. 2014.

TINKER, S. Oil & Gas water use in Texas: Update to the 2011 mining water use report. University of Texas. 2012.

TOBON, W. Análisis multicriterio. Taller: Información sobre biodiversidad para la conservación medioambiental. CONABIO. 2013.

VAZQUEZ O., et al. Post-Frac flowback water chemistry matching in a shale development. Society of petroleum engineers. 2014.

VIANA J. Guía para la disposición y tratamiento del agua producida. ARPEL, Asociación regional de empresas de petróleo y gas natural en Latinoamérica y el caribe.

WANG, G., et al. Catalyzed UV oxidation of organic pollutants in biologically treated wastewater effluents. Department of Public Health, National Taiwan University, Taipei. NCBI. 2001.

Water & Waste water International, <<Water lessons from the US to Europe>> [En línea]. Disponible en: <http://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-27/issue-2/regional-spotlight-europe/shale-gas-fracking.html>. [Último acceso: 07 10 16].

YOXTHEIMER. P. Shale Energy Produced fluids management and UIC well disposal trends. Penn State Marcellus Center for Outreach and research. 2015.

## ANEXOS.

### Anexo A. Recopilación de tratamientos.

TRATAMIENTO	CONTAMINANTE(S) A TRATAR. (OBJETIVO TRATAMIENTO)						COMENTARIOS ADICIONALES
	TSS	Aceite libre	Hierro	Ca - Mg	Orgánicos Solubles.	Sales.	
<b>Separador API</b>	Separa sólidos $\geq$ 100 micras	50-99% Eliminación aceite libre.	-	-	-	-	-
<b>Estanque Sedimentación.</b>	<b>X</b>	<b>X</b>	-	-	-	-	- No remueve partículas finas.
<b>Filtro lecho profundo</b>	Separa partículas $\geq$ 5 micras	-	-	-	-	-	- No se recomienda para aguas con aceite libre $\geq$ 100 ppm
<b>Hidrociclón</b> (Costo Estimado = 0,1-1,5 USD/Bbl)	85-95% remoción de partículas mayores a 12-15 micras.	85-95% remoción de partículas mayores a 12-15 micras.	-	-	-	-	- Ideal como filtro previo.
<b>Flotación inducida por gas</b>	93 remoción de aceite y solidos suspendidos	93% remoción de aceite y solidos suspendidos	-	-	-	-	Recuperación de líquidos cercana al 100%

<b>Aireación</b>	-	X	70-80% remoción de hierro.	-	-	-	- Es el método estándar para la remoción de hierro en la mayoría de estados en U.S.  - Se recomienda ajustar el pH a 7.5 para una mayor eficiencia.
<b>Ablandamiento Ash</b>	-	-	-	X	-	-	- Da como resultado un agua muy alcalina a la cual se le debe reajustar el pH
<b>Filtración arena.</b> (Costo estimado = 0,42-1,68 USD/Bbl)	Separa partículas ≥ 20 micras	-	-	-	-	-	- No se recomienda para aguas con altas cargas de contaminantes.
<b>Ozonación</b> (Costo estimado = 0,42 USD/Bbl)	-	90-99% remoción de orgánicos.	Carga salida hasta 5 ppm de hierro, sulfuros y manganeso.	-	90-99% remoción de orgánicos.	-	- Elimina compuestos orgánicos resistentes al tratamiento biológico.
<b>Radiación UV</b> (Costo estimado = 0,42 USD/Bbl)	-	-	-	-	90% remoción de orgánicos a condiciones normales de pH (6-7)	-	- La eficiencia es mayor en condiciones ácidas (pH 5)

<b>Carbón activado</b> (Costo estimado = 0,40-0,6 USD/Bbl)	-	-	-	-	Alta eficiencia de remoción.	-	- Se recomienda que la concentración de cloro sea menor a 1 ppm.
<b>Intercambio Iónico</b> (Costo estimado = 0,42-0,7 USD/Bbl)	-	-	Carga salida hasta 5-10 ppm de hierro y manganeso.	Se remueve casi todo el calcio y magnesio o presente.	-	-	- Requiere tratamiento previo de sólidos y aceite libre para evitar incrustaciones de resinas.
<b>Tratamientos Biológicos</b>	-	-	-	-	90% remoción de orgánicos y hasta 98% de BETEX.	-	- Tienen como principio el uso de bacterias.
<b>Filtración</b> (Costo estimado = 0,1-1,5 USD/Bbl)	Separa partículas $\geq$ 1 micra	Separa partículas $\geq$ 1 micra	-	-	-	-	-
<b>Microfiltración</b>	Separa partículas $\geq$ 60 nm	Separa partículas $\geq$ 60 nm	-	-	-	-	-

<p><b>Ultrafiltración</b> (Costo estimado = 2-2,5 USD/Bbl)</p>	<p>Separa partículas <math>\geq</math> 10 nm</p>	<p>Separa partículas <math>\geq</math> 10 nm</p>	-	-	-	-	<p>- Puede eliminar algunos solutos y sales orgánicas de bajo peso molecular.</p>
<p><b>Nano filtración</b> (Costo estimado = 2,5-4 USD/Bbl)</p>	<p>Separa partículas <math>\geq</math> 1nm</p>	<p>Separa partículas <math>\geq</math> 1nm</p>	-	-	-	<p>Puede alcanzar una eficiencia cercana al 98% en remoción de orgánicos y sales, con recuperación cercana al 75% de líquido.</p>	<p>- Se selecciona cuando la OI y ultrafiltración no son elegibles.</p>
<p><b>Electrocoagulación</b> (Costo estimado = 1-2 USD/Bbl)</p>	<p>Remoción 99%</p>	<p>Remoción 99%</p>	x	x	x		<p>En los últimos años ha sido muy utilizado por la industria petrolera en US y lo han adaptado varias empresas de tratamiento de aguas Ej.: El sistema Clean Wave de Halliburton.</p> <p>Puede ir acompañado de electro-floculación.</p>
<p><b>FTE</b> (Costo estimado = 2,37-2,8 USD/Bbl)</p>	<p>90% remoción de TSS, TDS, compuestos orgánicos y metales pesados.</p>	-	-	-	<p>90% remoción de TSS, TDS, compuestos orgánicos</p>	<p>90% remoción de TSS, TDS, compuestos orgánicos y metales pesados.</p>	-

					y metales pesados.		
<b>Electrodiálisis</b> (Costo estimado = 1,82-12,25)	-	-	-	-	X	X	Alta recuperación de líquidos >92%
<b>Evaporación térmica/condensación</b>	-	-	-	-	X	En salmuera de 75.000 ppm TDS = Remoción salmuera cercana al 75% y recuperación de líquido superior al 70%. En salmuera de 150.000 ppm TDS = Remoción salmuera cercana al 50% y 50% recuperación de líquido.	- La eficiencia varía según la cantidad de TDS.  - Puede utilizarse en aguas de hasta 250.000 ppm de TDS. - Se obtienen algunos desechos líquidos.
<b>Cristalización</b> (Costo estimado = 10,5 USD/Bbl)	-	-	-	-	X	Eficiencia similar a la evaporación/condensación.	- No contempla desechos líquidos (ZLD). - Grandes tamaños de equipos. - Se obtienen grandes volúmenes de sal como residuo sólido.
	-	-	-	-	-	Hasta 66% remoción de cloruros.	- Proceso a alta presión (600-900 psig).

<p><b>Osmosis inversa</b> (Costo estimado = 0,42-3,50 USD/Bbl)</p>							<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trata salmueras de hasta 40.000 ppm de TDS.</li> <li>- Requiere tratamiento previo de aceites libres y solidos disueltos.</li> </ul>
<p><b>Mechanical Vapor Recompression (MVR)</b> (Costo estimado = 3-5 USD/Bbl)</p>						<p>Trata TDS &gt;200.000 ppm</p>	<p>Puede presentar problemas de corrosión e incrustaciones, requiere tratamiento previo. Recuperación de líquidos 50-90%</p>
<p><b>Destilación.</b> (Costo estimado = 8-10 USD/Bbl)</p>	-	-	-	-	-	<p>Eficiencia de eliminación cercana al 98%</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Altos consumos energéticos.</li> <li>- Remueve contaminantes cuyo punto de ebullición sea mayor a 100 ° C</li> </ul>

## Anexo B. Calidad del agua para reúso.

	Flowback Marcellus <sup>1</sup>	Flowback Barnett <sup>1</sup>	Flowback Haynesville <sup>1</sup>	Frac Water <sup>2</sup>	Parámetros para la descarga en la etapa de producción <sup>3</sup>
Orgánicos (mg/l)	-	-	-	30	15
TDS (mg/l)	130.000-190.000	39.570	120.000-200.000	50.000	-
TSS (mg/l)	140-1.500	-	2.000-3.000	100	50
Cl (mg/l)	60.000-100.000	23.797	50.000-100.000	10.000	1200
Bario (mg/l)	-	42	6.000-7.500	20	-
pH	5-6-5		7.0-7-2	6.5-8	6-9
Hierro (mg/l)	50-100	33	-	10	3
Calcio (mg/l)	7.000-16.500	2.242	12.000-15.000	250	-
Mg (mg/l)	-	253	-	100	-
Sodio (mg/l)	35.000-60.000	-	-	5.000	-

**Fuente:**

<sup>1</sup>Horner P. 2011.

<sup>2</sup>George E. Hydraulic Fracturing 101: What every representative, environmentalist, regulator, reporter, investor, University researcher, neighbor and engineer should know about estimating frac risk and improving frac performance in unconventional gas and Oil Wells. SPE 152596. 2012.

<sup>3</sup>MINISTERIO DE AMBIENTE. Resolución 0631 de 2015

### Anexo C. Formato encuesta ambiental

#### DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA SOFTWARE DE ANÁLISIS MULTICRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE MÉTODOS DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES EN SHALE PLAYS.

*Esta encuesta se desarrolla con el fin de definir criterios ambientales y obtener la opinión de expertos en el área ambiental para el desarrollo de una herramienta software para el manejo de aguas residuales en Shale Plays.*

Los criterios a evaluar se han elegido a partir de una revisión bibliográfica sobre el manejo de aguas de fracking en Estados Unidos. Con el fin de ponderar las alternativas para el manejo de aguas residuales en shale plays, por favor indique la importancia que considere deben tener estos criterios al momento de elegir el mejor método de disposición del agua. Además, para cada uno de estos criterios evalúe a partir de su experiencia el nivel de impacto ambiental (bajo impacto ambiental o alto impacto ambiental) que se le puede asociar a cada uno de los métodos de disposición, en caso de que no se genera algún tipo de impacto ambiental en algún método de disposición escriba en la casilla la letra "N".

Criterio	Importancia del criterio*	Descripción	Valoración	N: No hay impacto B: Bajo impacto. A: Alto impacto		
	0: No relevante 100: Muy importante		Método de disposición**			
			Reciclaje	Reúso	Inyección	
Demanda de Agua		Competencia del agua en la zona con otros sectores: Industrial, agrícola, ganadero, etc. Se relaciona con el alto consumo de agua para el desarrollo de Yacimientos no convencionales y se analizan 3 posibles escenarios.	Zona Demanda Alta de agua			
			Zona Demanda Moderada de agua			
			Zona Demanda Baja de agua			
Ciclo Hidrológico		Pérdida del agua del ciclo hidrológico.				
Tráfico de camiones		Incluye: Emisiones de GEI, ruido, deforestación, etc.	Bajo tráfico			
			Alto tráfico			

Contaminación de aguas		Riesgos a contaminación de aguas superficiales y subterráneas			
Energía consumida		Energía total usada por cada método de disposición.			
Emisiones de gases de efecto invernadero		Emisiones de gases de invernadero de las plantas de tratamiento y equipos.			
Micro sismicidad inducida		Riesgo a generar microsismos en la zona.			
Efectos en la salud		Efecto en la salud de los trabajadores debido al contacto directo con los desechos o la inhalación de contaminantes volátiles.			

\* Si no se asigna un valor de importancia a cada criterio se otorgará un valor de 100 a todos los criterios, dando a entender que todos los criterios tienen el mismo peso en la decisión.

\*\* Los métodos de disposición considerados en esta herramienta son: Reciclaje (hace referencia a re-utilizar el agua en otras industrias), Re-uso (Hace referencia a re-utilizar el agua en la industria petrolera, principalmente para nuevos fluidos de fractura) e Inyección (hace referencia al uso de pozos subterráneos para la inyección de residuos líquidos).

*Por favor si considera que un factor ambiental fue omitido en la tabla anterior, escríbalo a continuación junto con su valoración correspondiente:*

<b>Criterio</b>	<b>Importancia</b>	<b>Descripción</b>	<b>Reciclaje</b>	<b>Reúso</b>	<b>Inyección</b>

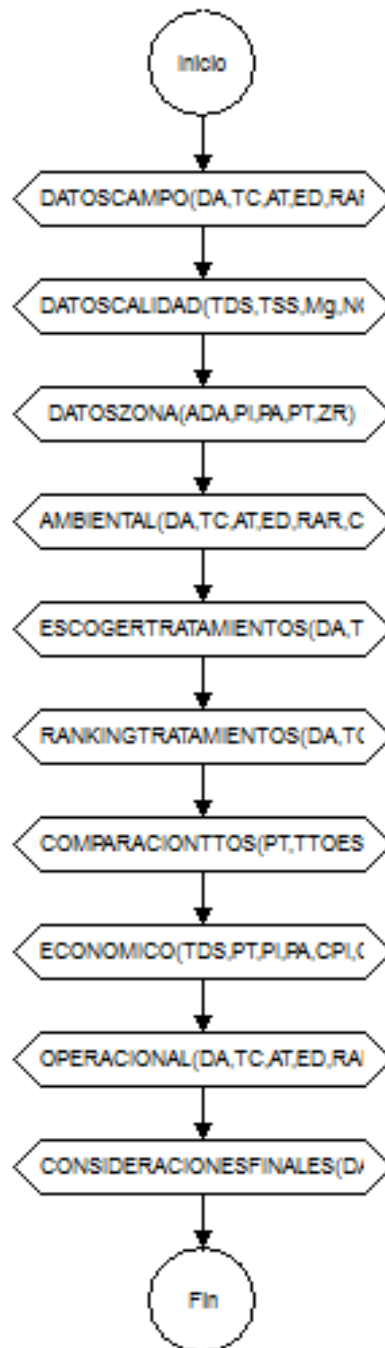
Gracias por su colaboración. La información proporcionada es muy importante para el desarrollo de este proyecto académico y será tenida en cuenta para el desarrollo de una herramienta multicriterio para la disposición de aguas en shale plays.

\_\_\_\_\_

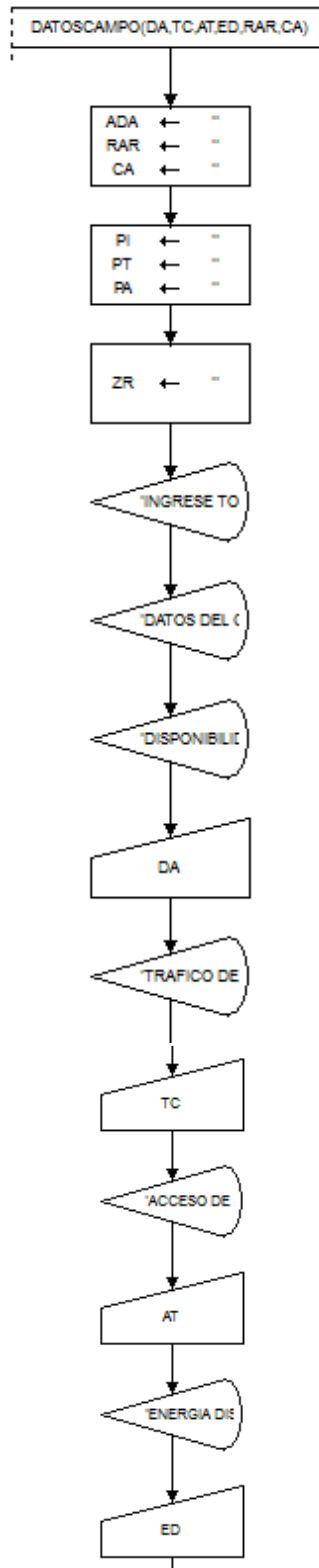
Avala.

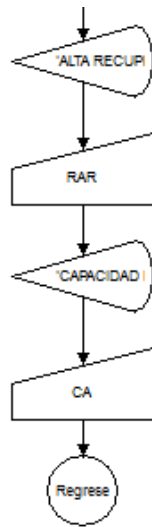
Anexo D. Diagrama de flujo.

Diagrama inicio donde se muestran los subprogramas.

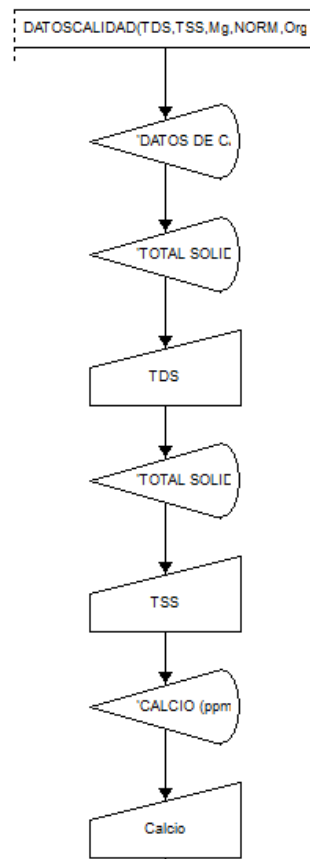


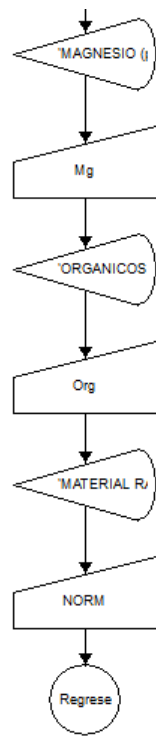
## Subprograma datos de campo.



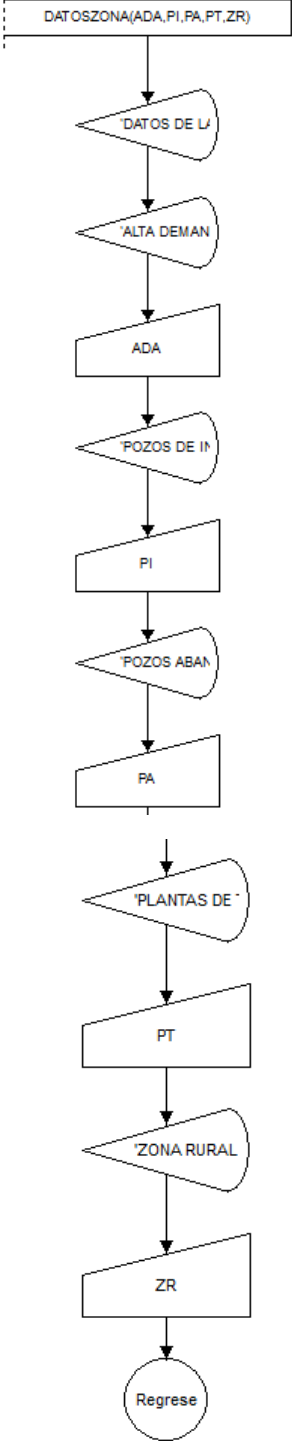


**Subprograma Datos de calidad.**

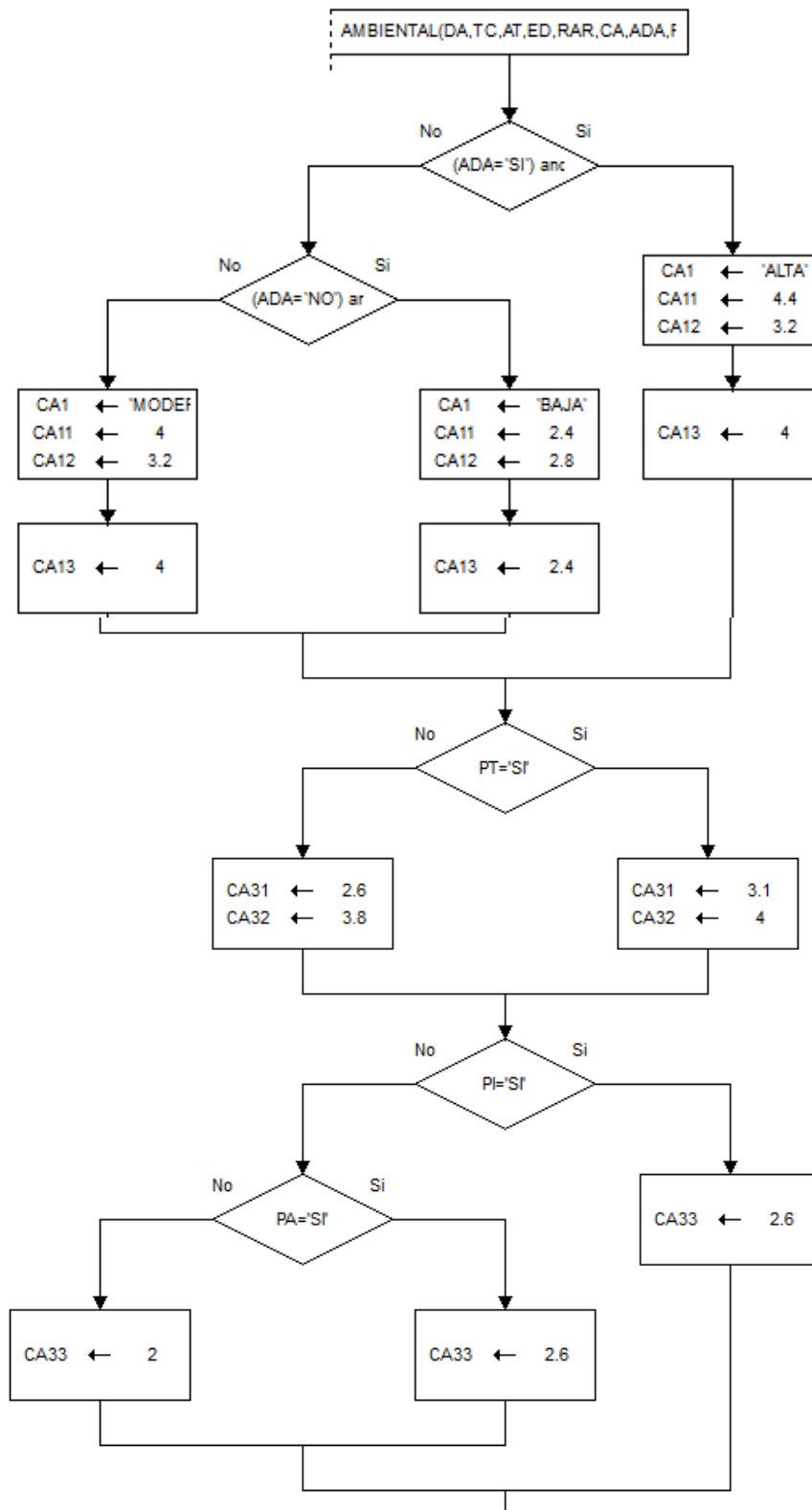


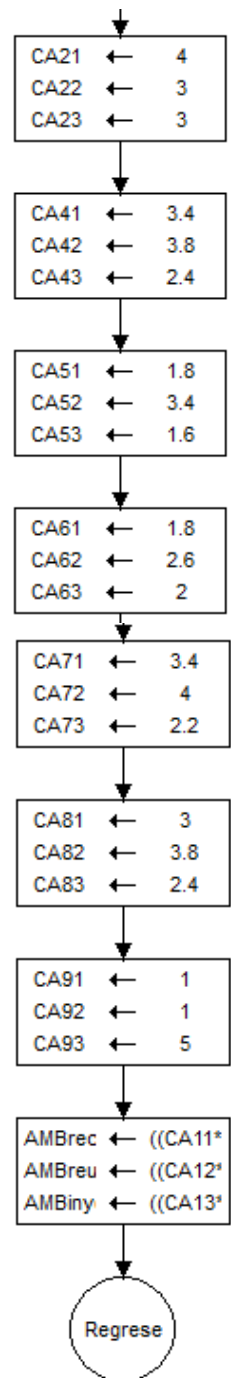


**Subprograma Datos de zona.**

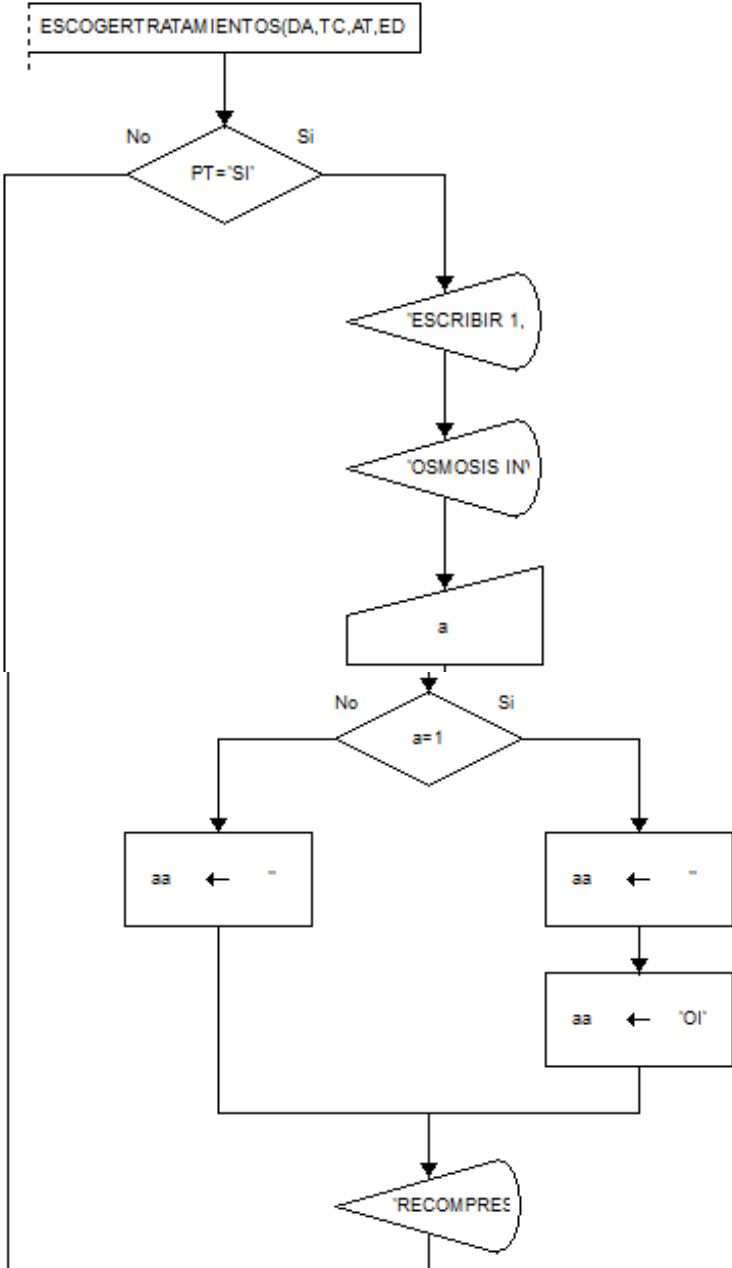


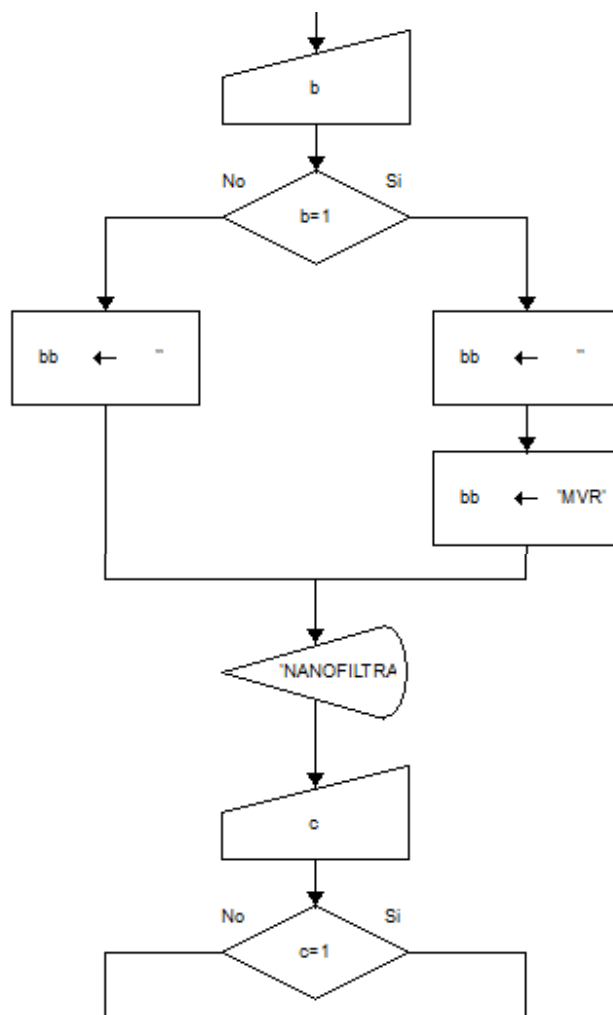
## Subprograma Ambiental.

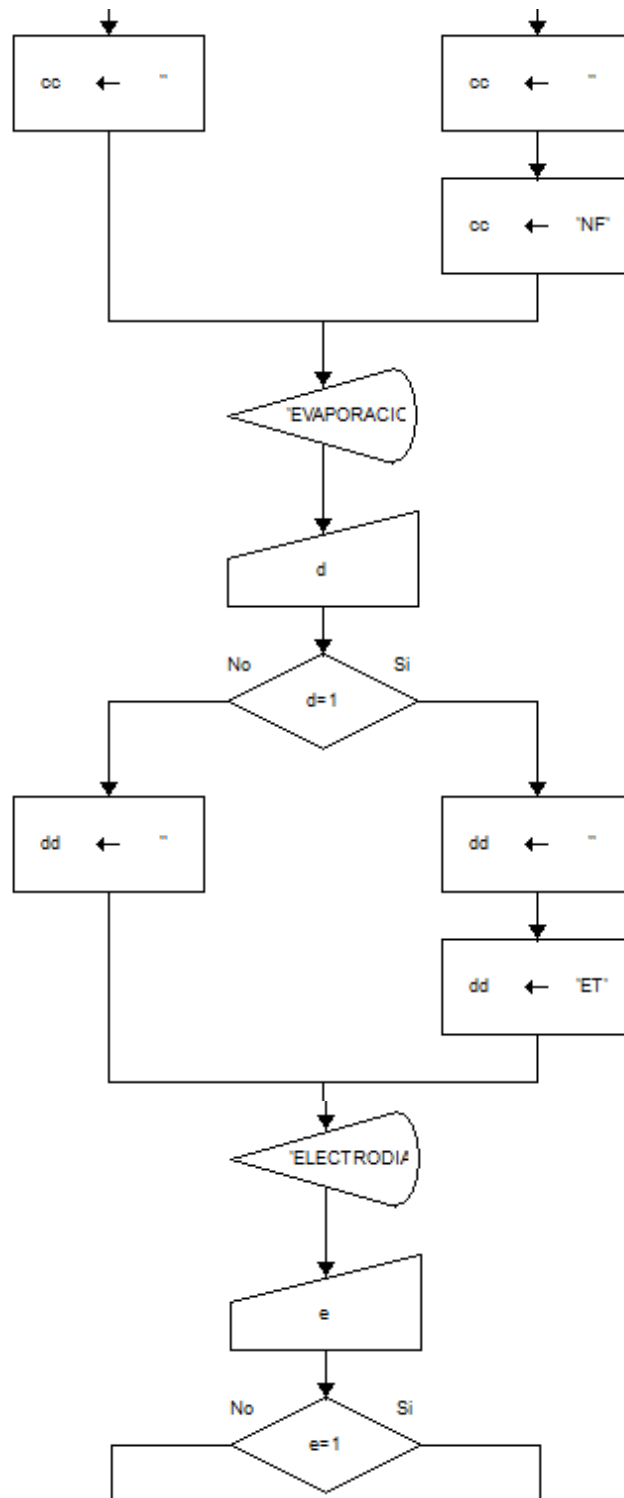


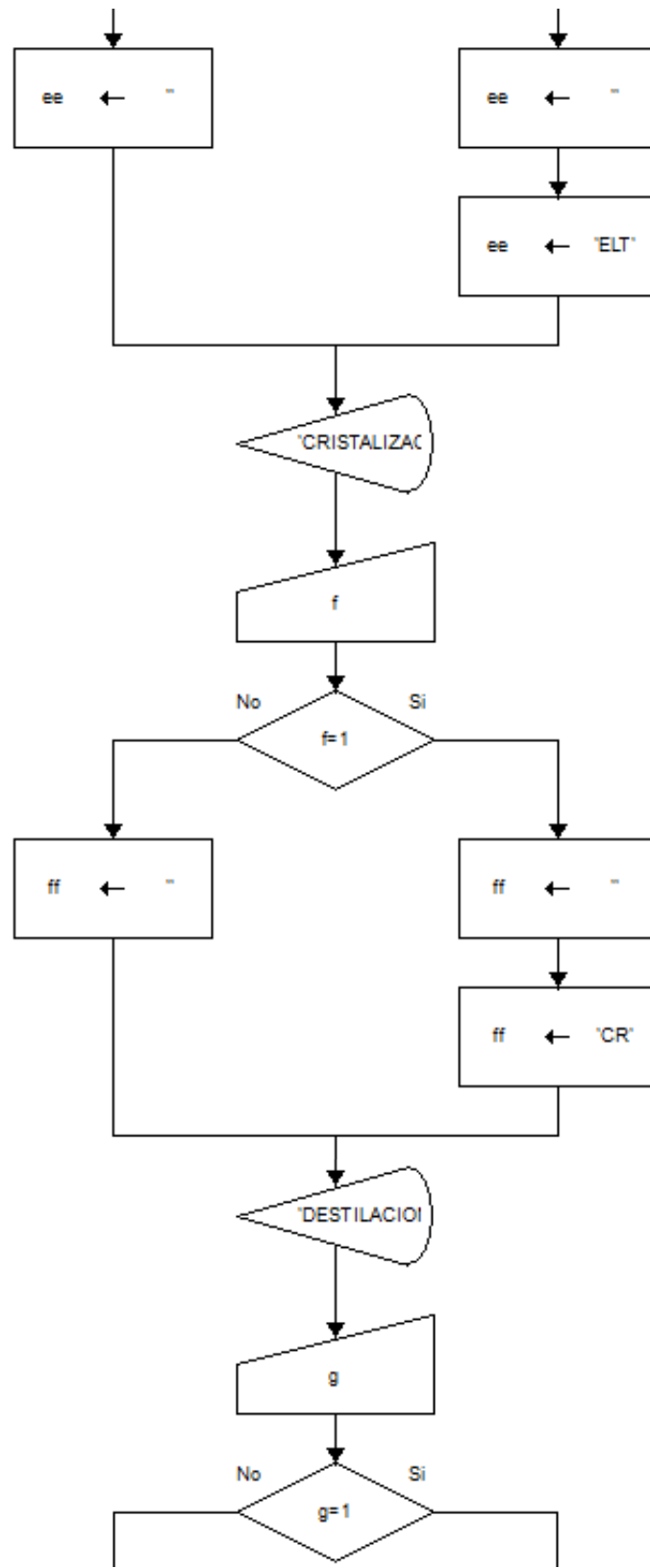


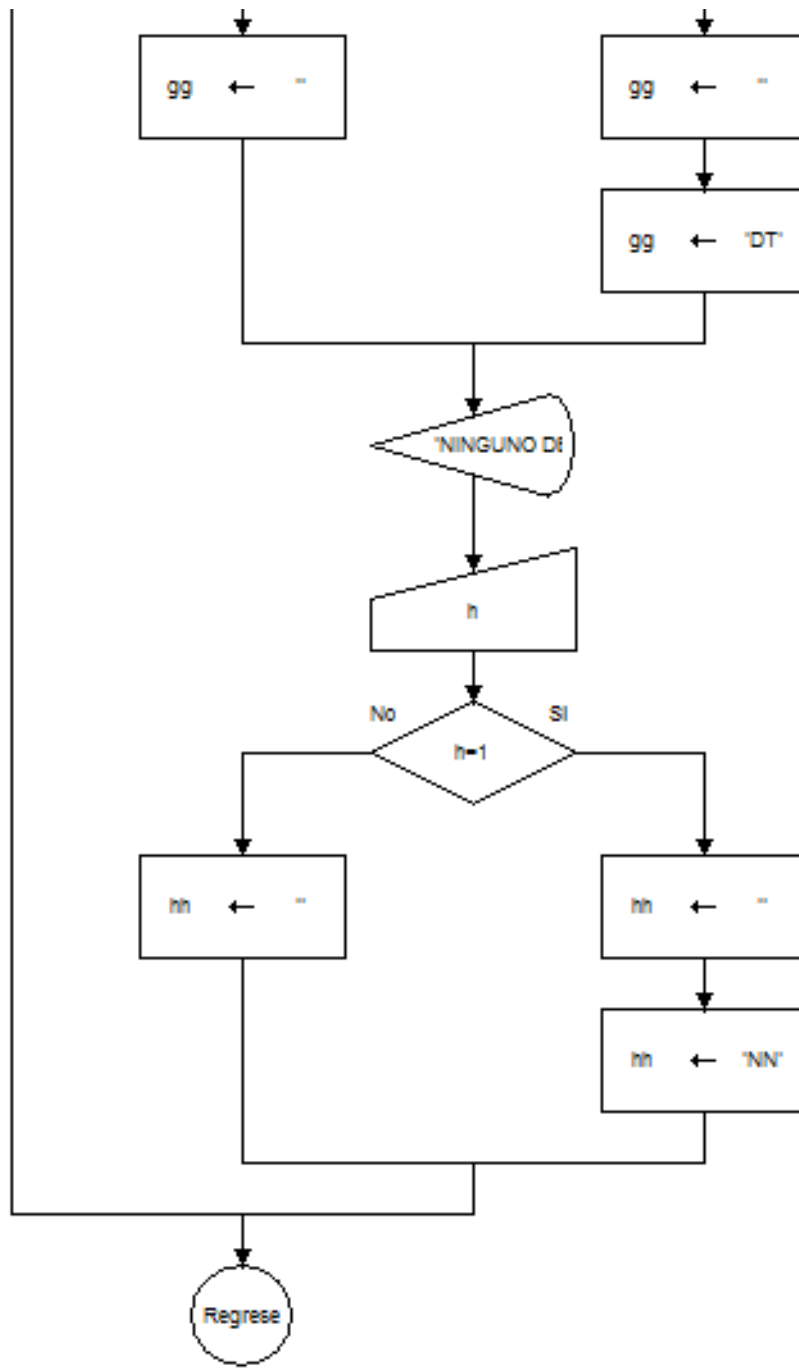
# Subprograma Escoger



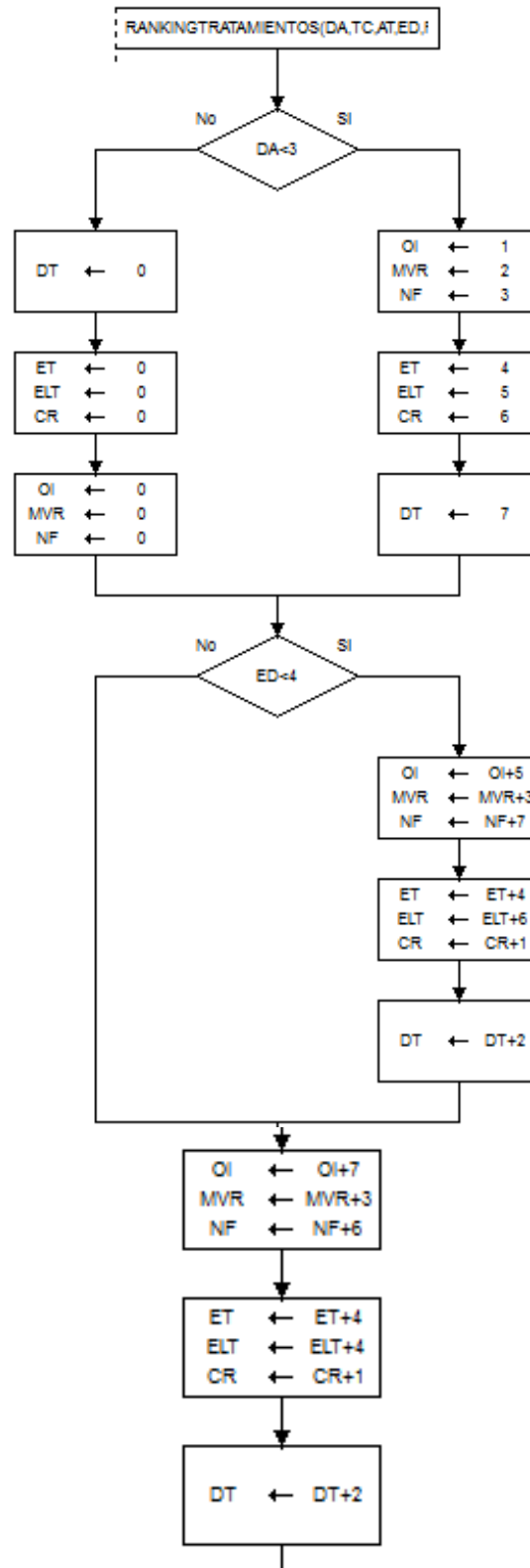


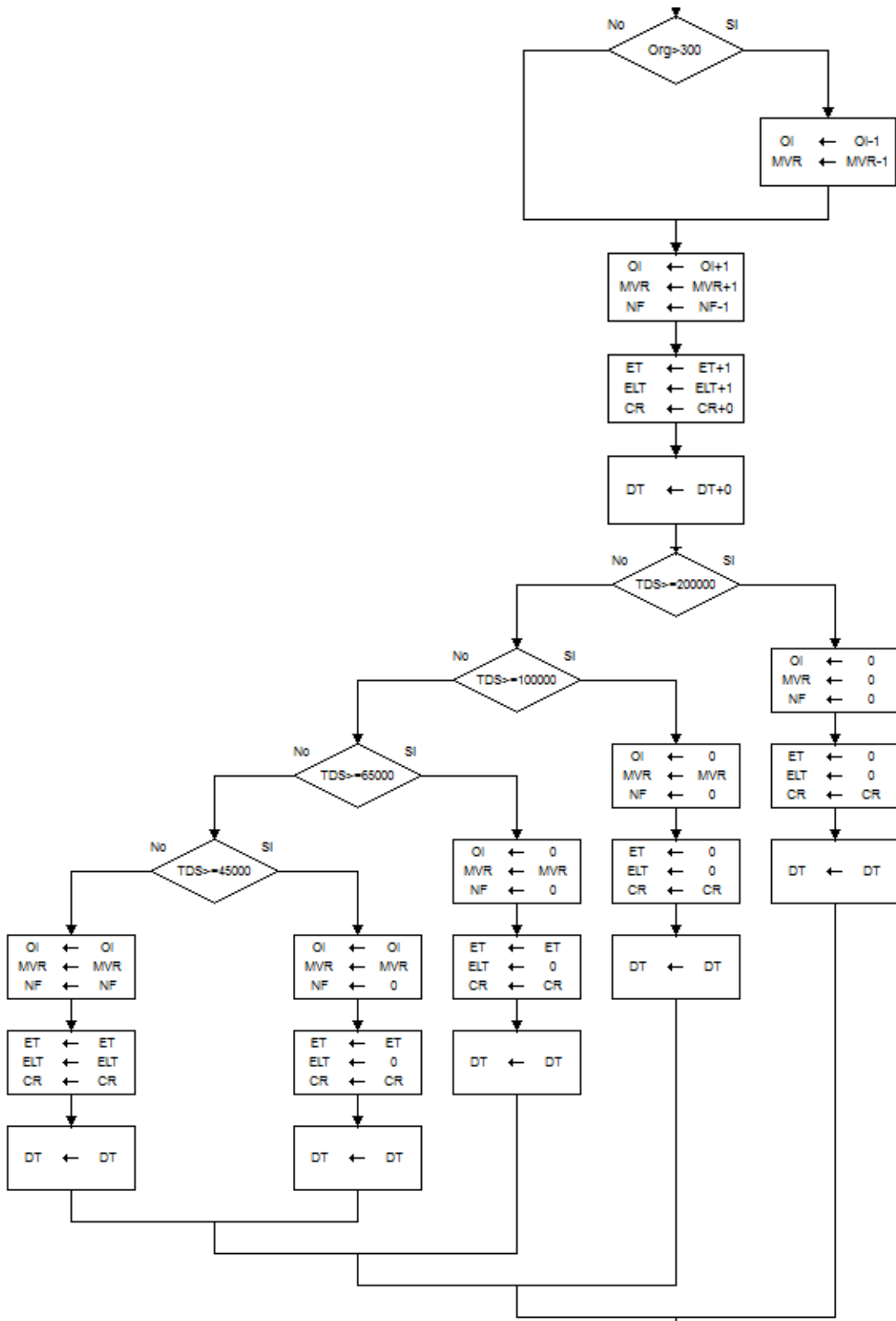


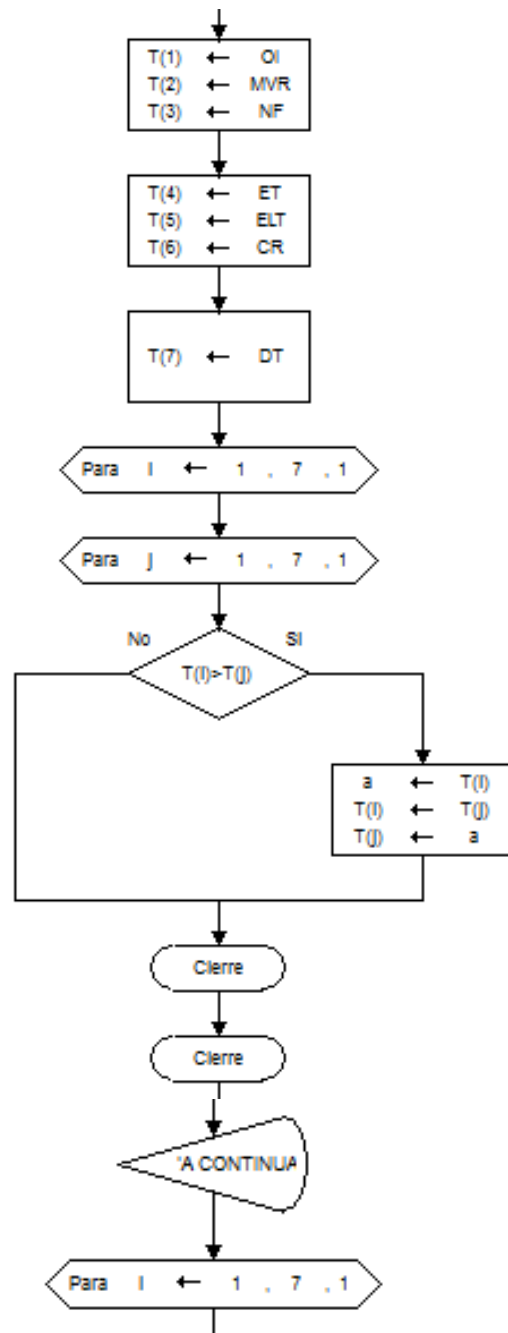


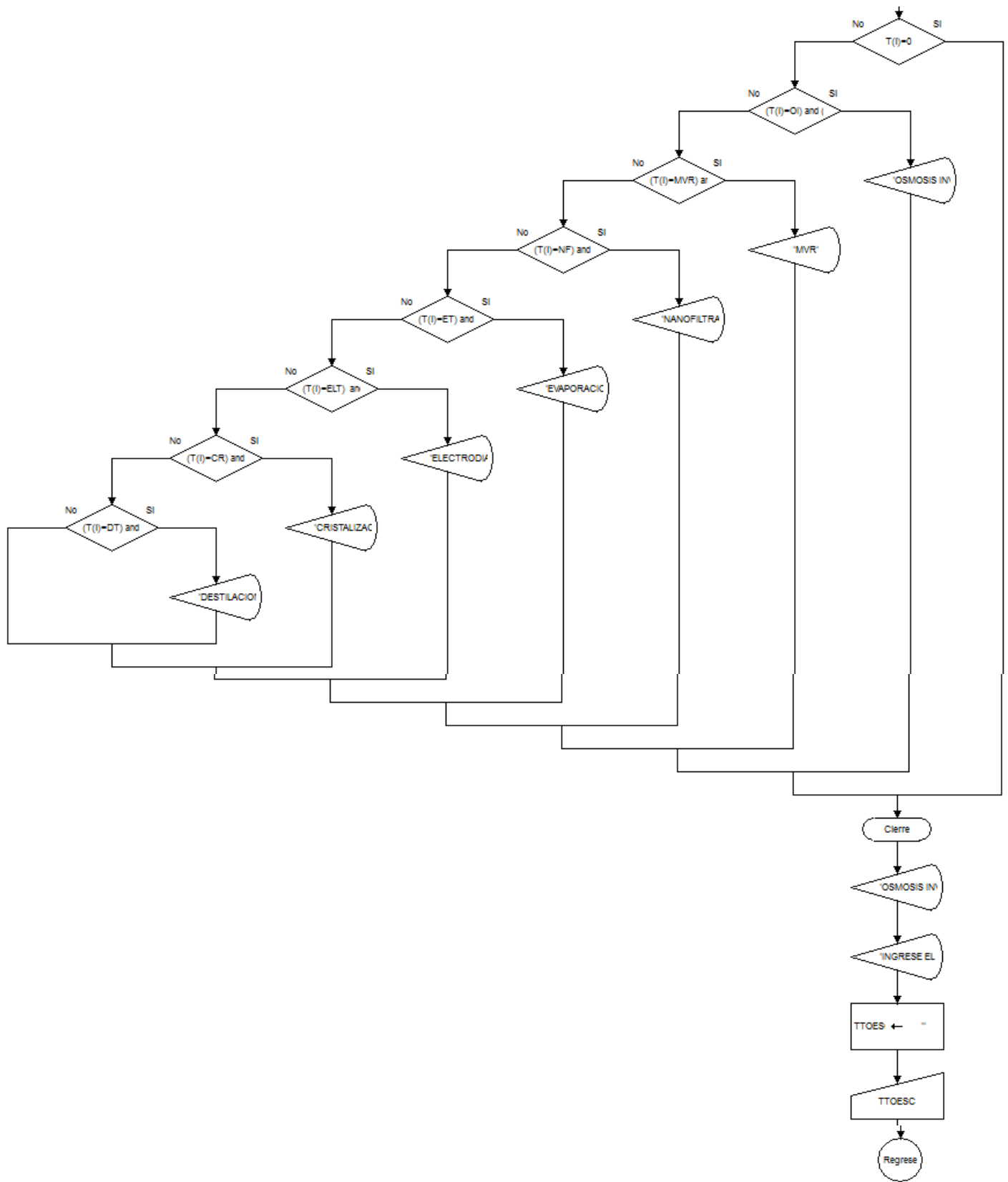


### Subprograma ranking tratamientos.

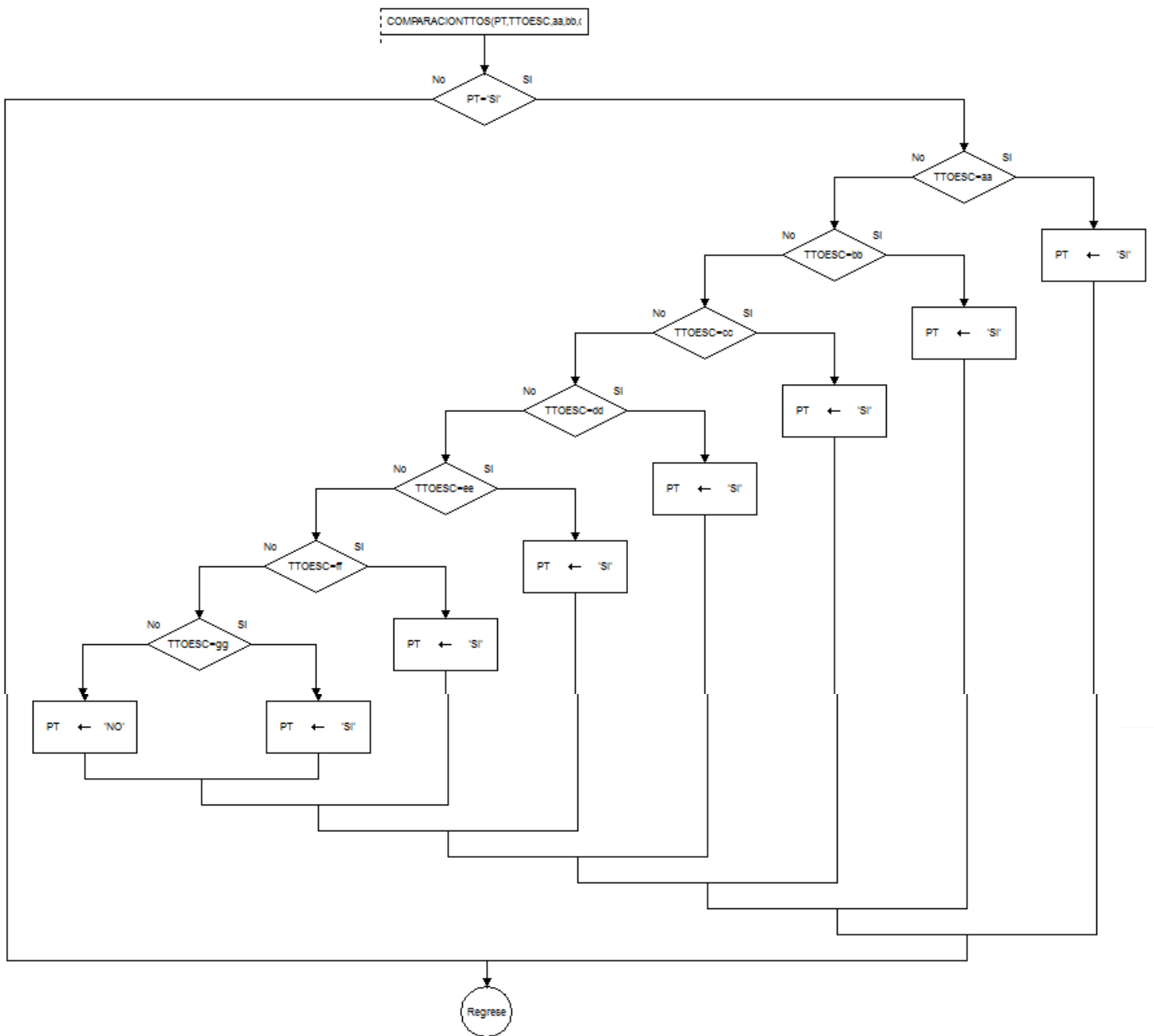




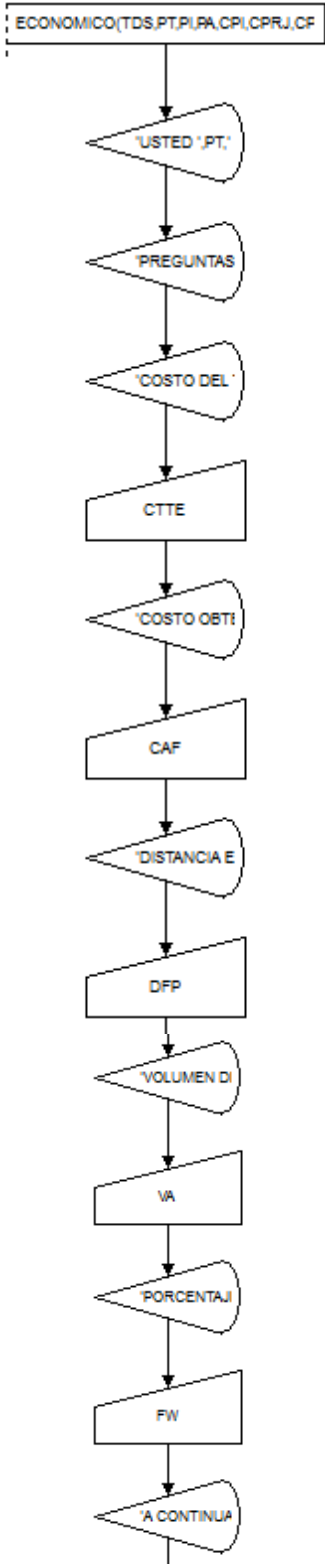


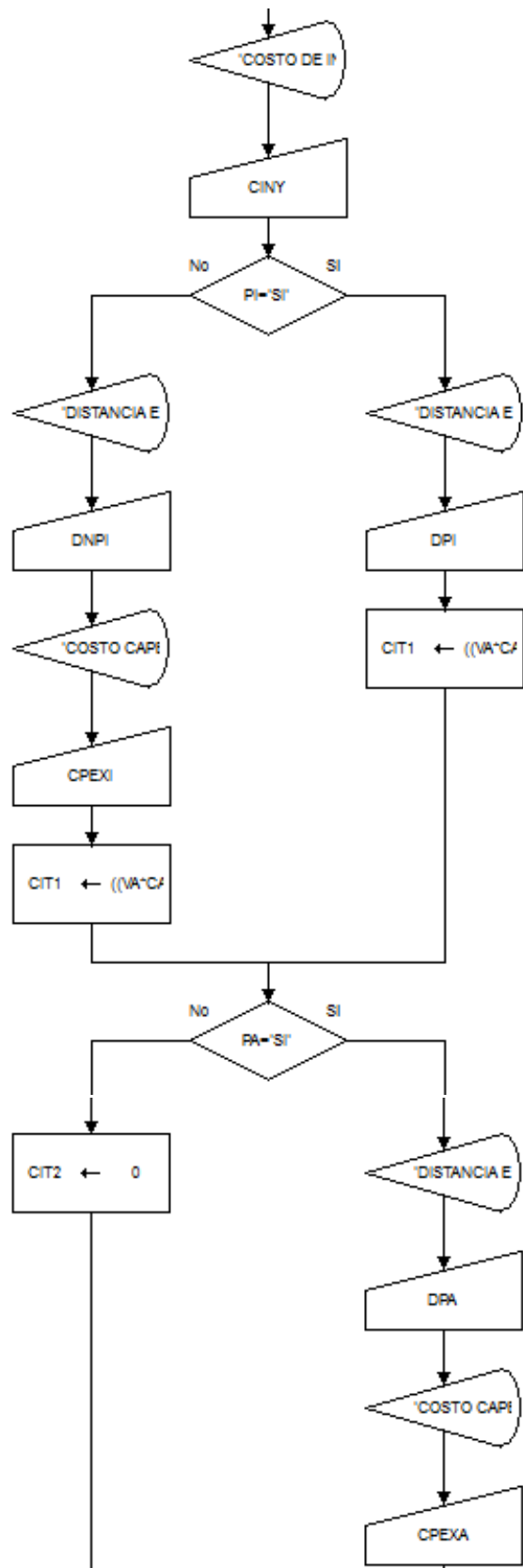


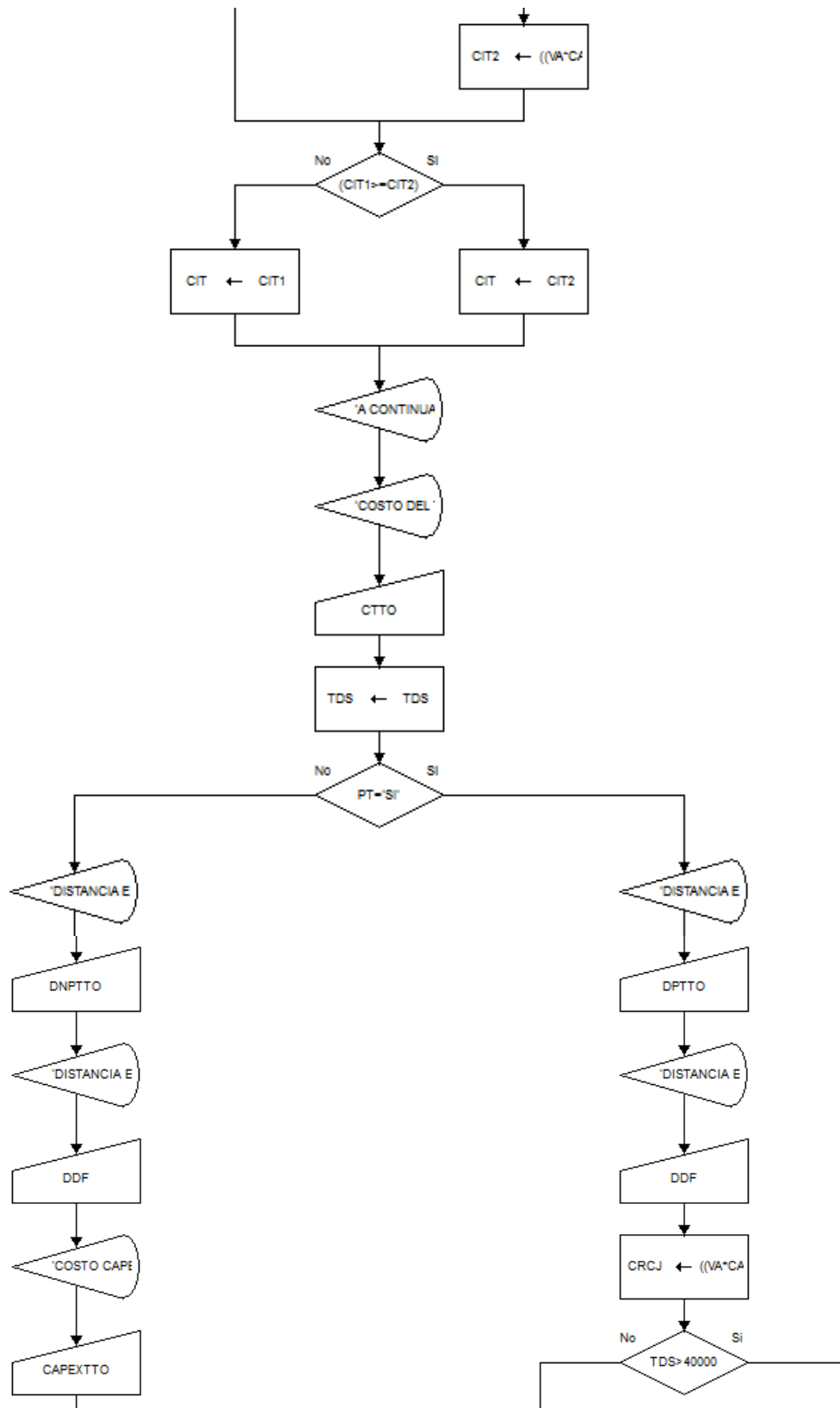
### Subprograma comparación de tratamientos.

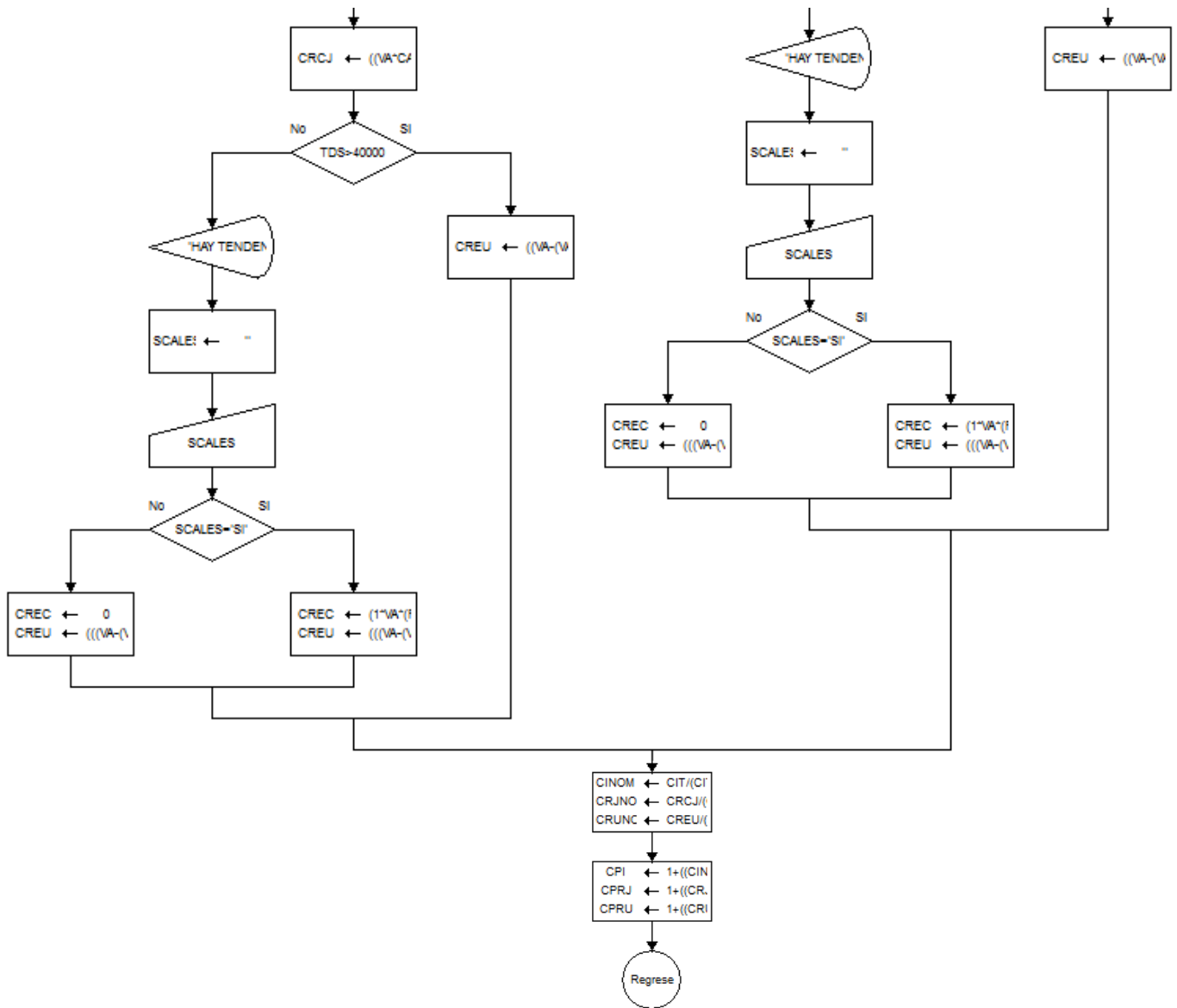


**Subprograma Económico.**

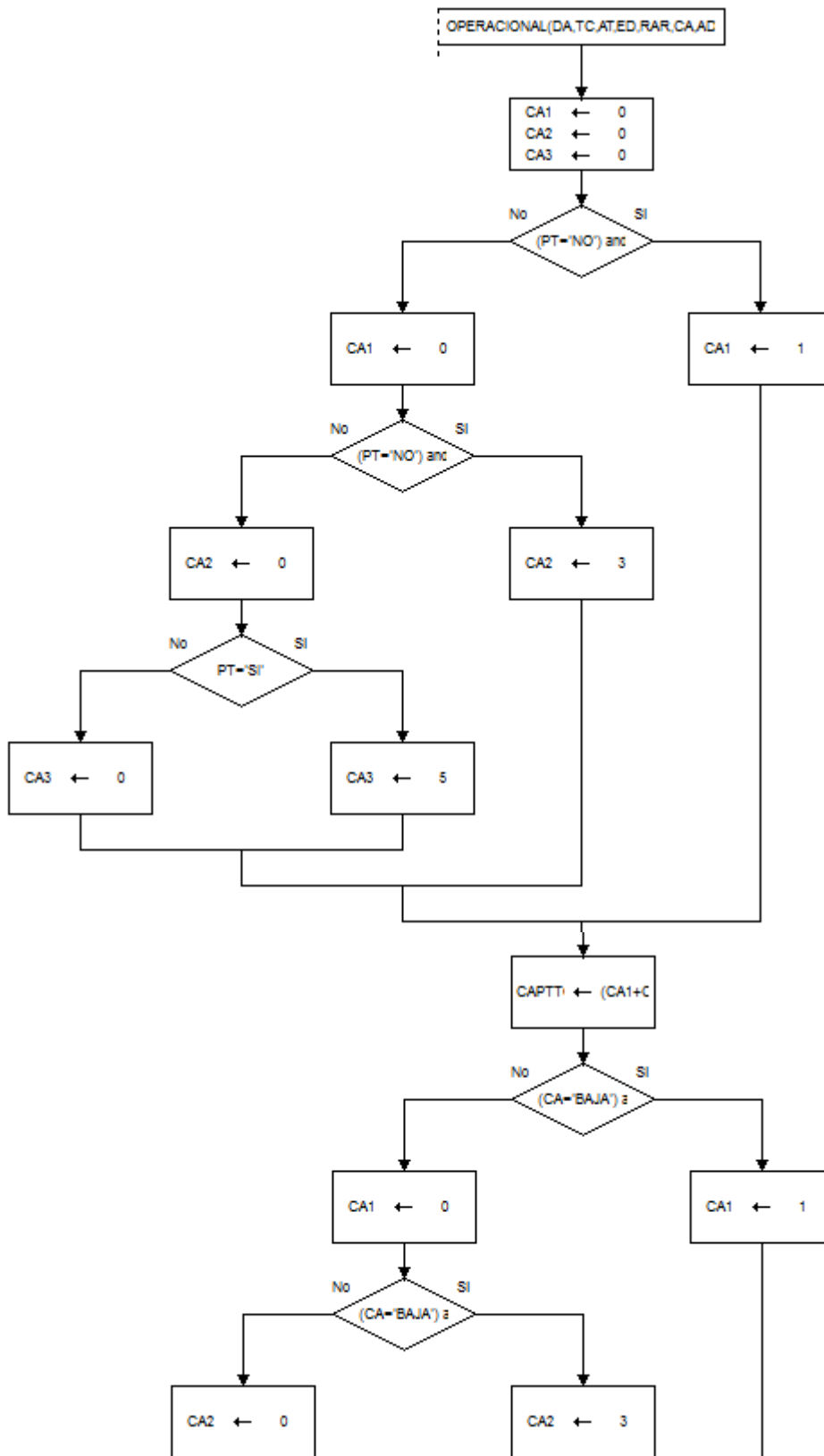


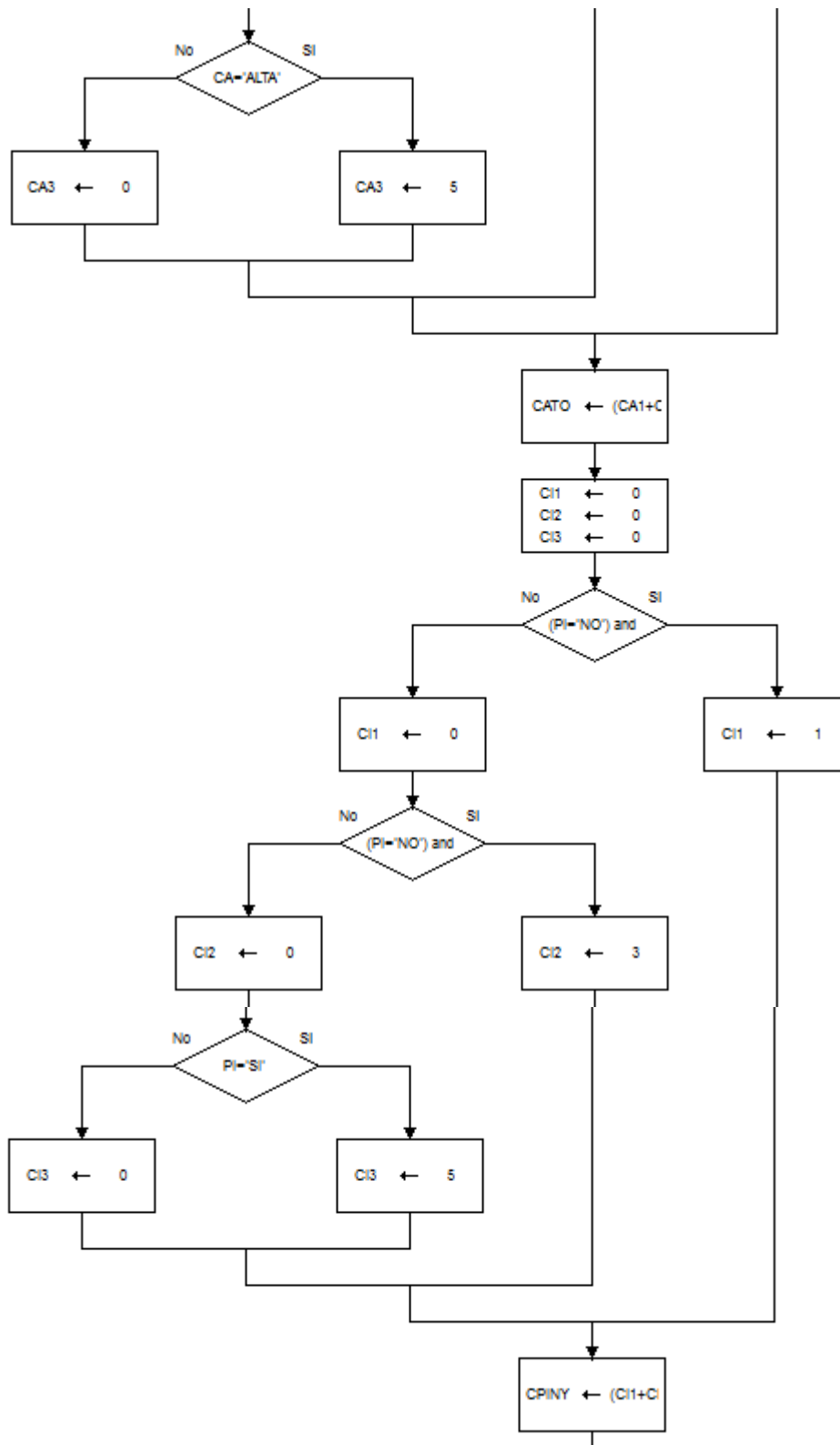


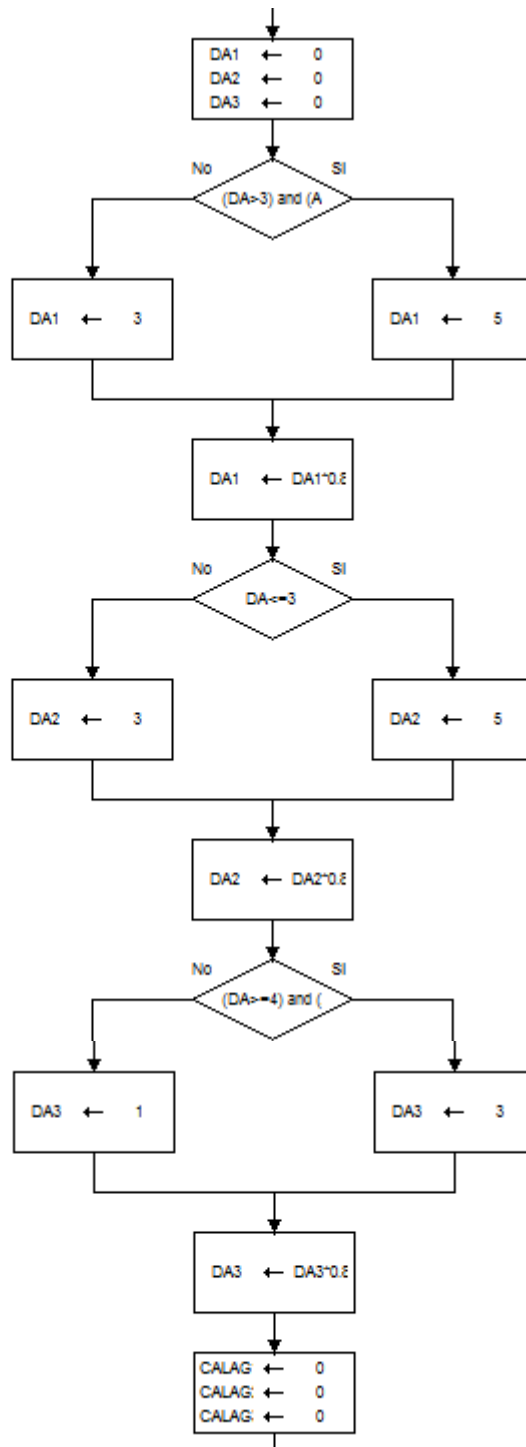


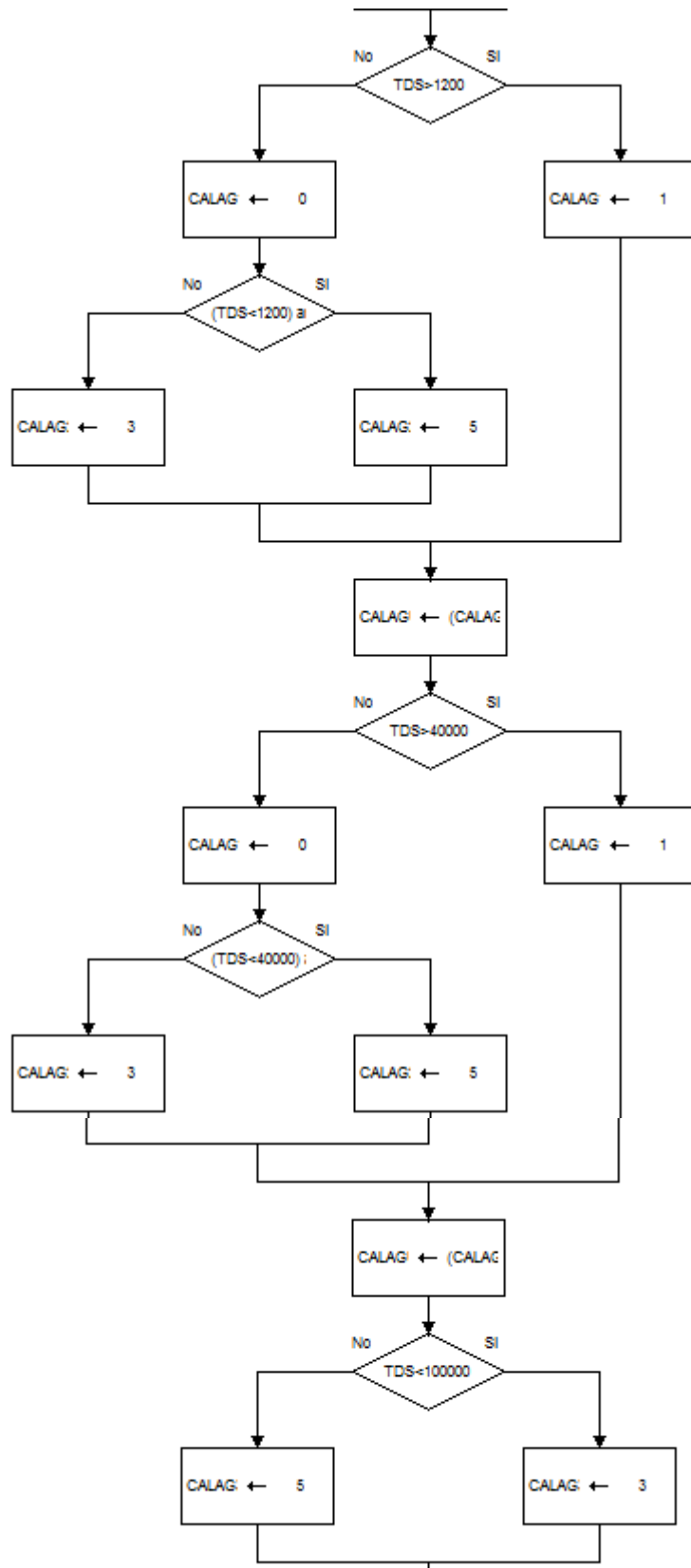


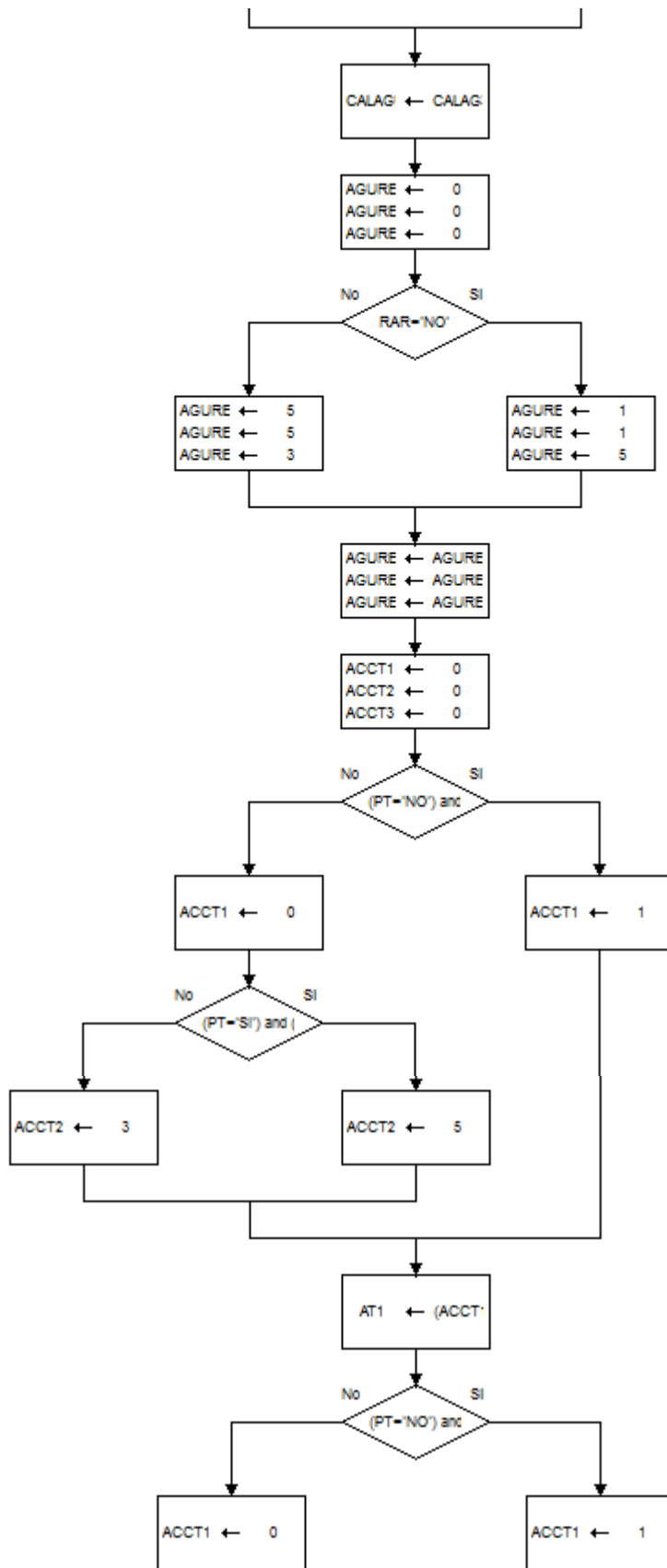
## Subprograma operacional.

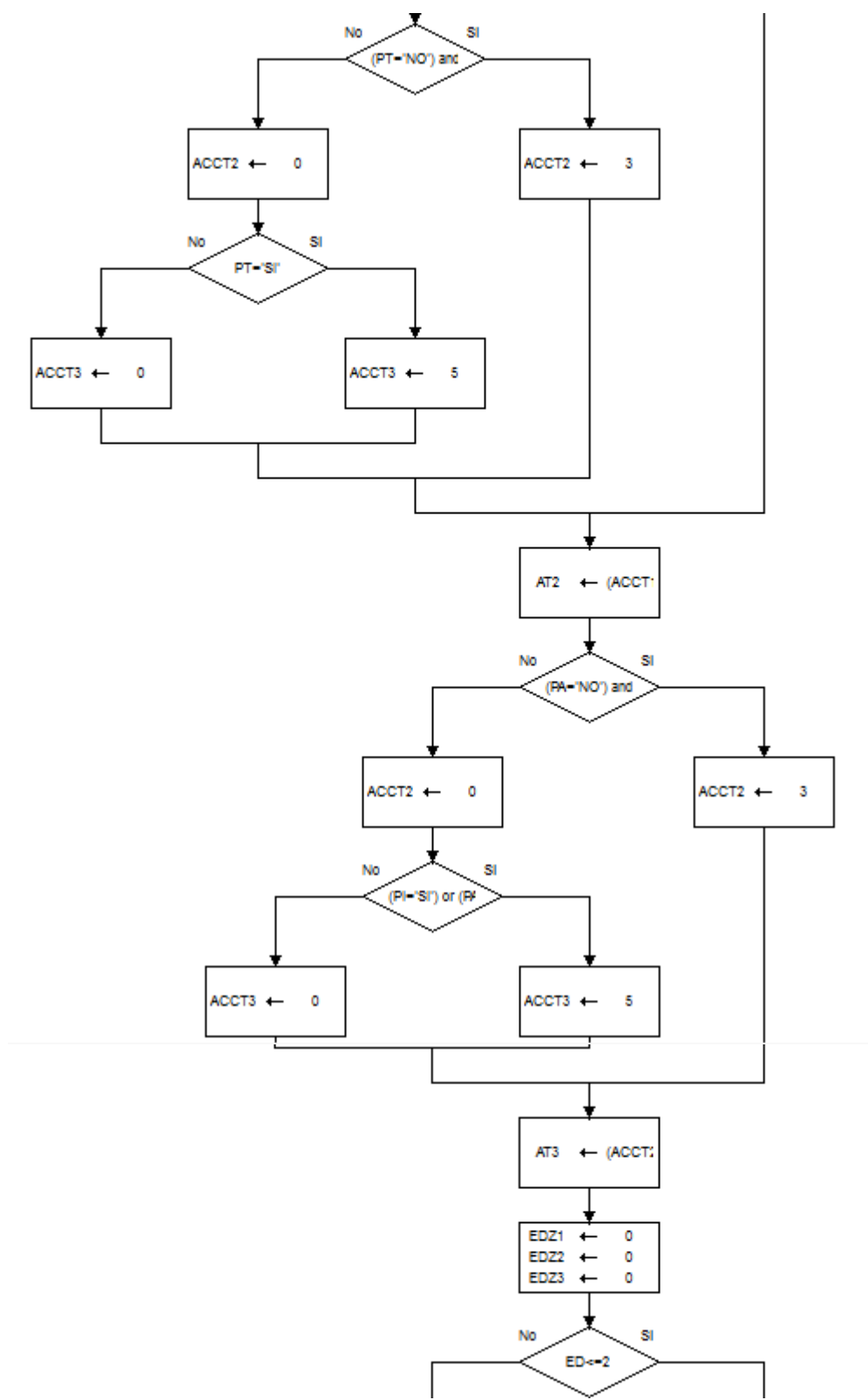


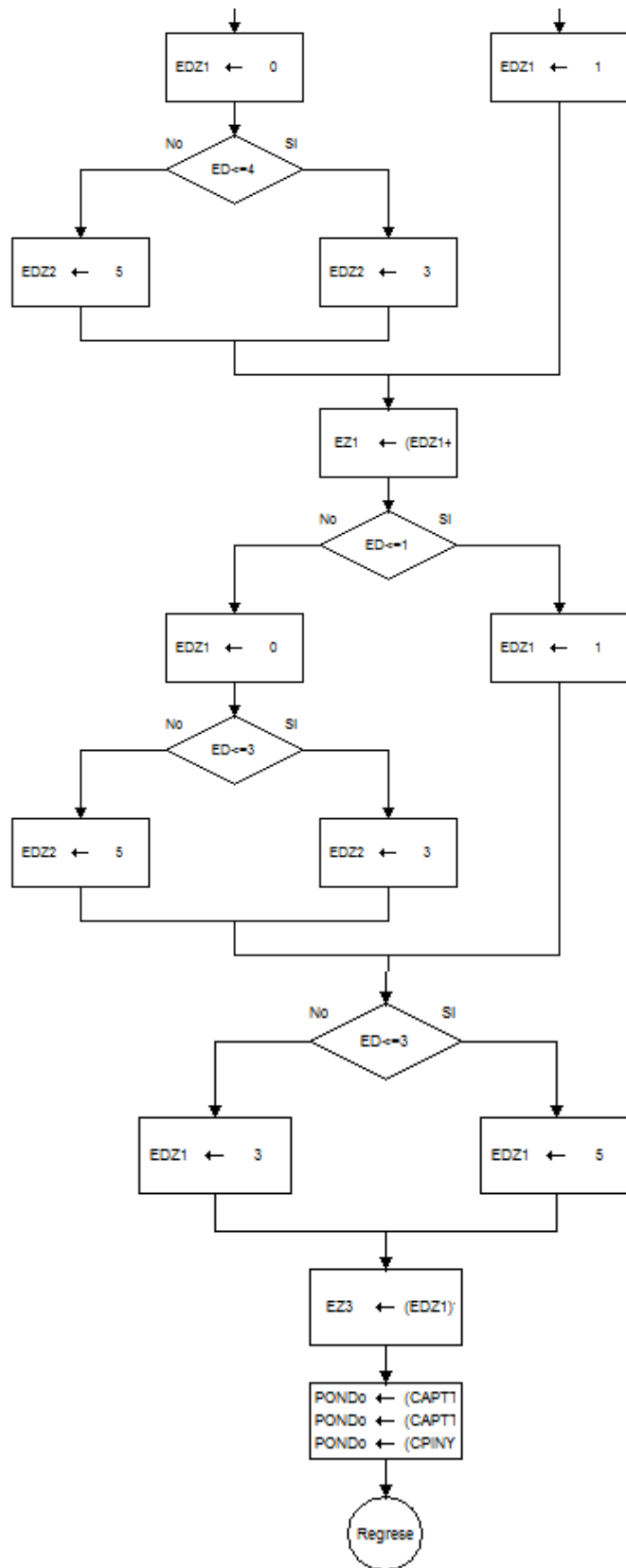












## Subprograma consideraciones finales.

