



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO**

---

---

**DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO  
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA EL  
USO ÓPTIMO DEL AGUA RESIDUAL EN LA  
OPERACIÓN DE CAMPOS DE GAS SHALE**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**MAESTRA EN CIENCIAS EN  
INGENIERÍA QUÍMICA**

**P R E S E N T A:**

**ING.TANIA ITZEL SERRANO  
ARÉVALO**



Director de Tesis:  
DR. JOSÉ MARÍA PONCE ORTEGA  
Co-Director:  
DR. LUIS FERNANDO LIRA BARRAGÁN

**MORELIA MICH.**

**FEBRERO 2022**

*A mis padres, Martha y Raúl... Con todo mi amor.*

*Estoy entre aquellos que piensan que la ciencia tiene una gran belleza.*

*Marie Curie.*

## AGRADECIMIENTOS

A mi familia, Martha y Raúl por ser los padres que me han apoyado en todo momento, por darme el ánimo de seguir adelante y transmitir las ganas de superarme, por tener las palabras correctas en el momento correcto, por enseñarme esos valores que sin duda han sido parte importante de lo que soy ahora, por apoyarme en mis decisiones, gracias por todo, los amo y admiro mucho. A mis hermanos Karla y Kevin, me han enseñado a ver las cosas de la mejor manera, gracias por estar siempre a mi lado y por ser mi alegría. A Issis por ser esa personita que me da tanta paz y felicidad. Dorothy y Hande por brindarme su compañía.

Anibal Sierra, gracias por ser parte fundamental de este proceso, por estar desde el principio y hasta el fin, por tu ánimo a diario y por celebrar conmigo cada logro, por tus enseñanzas que sin duda me han ayudado a crecer académica y personalmente, por creer en mí y por inspirarme a cumplir mis metas, mi más sincero agradecimiento.

A mi asesor, José María Ponce, gracias por siempre estar en la mejor disposición y permitirme aprender de sus conocimientos, su valioso tiempo en este trabajo, por despertar en mí el interés de la investigación y por creer en mí desde el primer momento, por su apoyo estaré eternamente agradecida. A mi co-asesor Luis Fernando Lira por su apoyo en este trabajo, por sus enseñanzas y por creer en mí, por darme la oportunidad de concretar este trabajo. A los integrantes de mi comité, César Ramírez, Fabricio Nápoles y Agustín Jaime Castro, por aceptar brindarme su apoyo durante el proceso, por su disponibilidad, sus sabias observaciones, por el interés que han mostrado y sobre todo por inspirarme a crecer académicamente.

De igual forma deseo agradecer con mucho cariño a mi familia, tíos, primos, abuelos, quienes me motivaron a seguir mis estudios y por sus palabras motivadoras. A mis amigos, por compartir grandes momentos y aprender de ustedes. A Dios por darme la oportunidad de seguir cumpliendo mis metas.

A la UMSNH por abrirme las puertas de sus instituciones para poder cumplir mis metas, al CONACYT por el apoyo brindado durante mis estudios y darme la oportunidad de seguir ampliando mis conocimientos. Finalmente, gracias a cada una de las personas que estuvieron presentes durante este gran proceso del que sin duda he aprendido demasiado.

## RESUMEN

# PLANIFICACIÓN ESTRATÉGICA PARA EL USO ÓPTIMO DEL AGUA RESIDUAL EN LA OPERACIÓN DE CAMPOS DE GAS SHALE

Por

Ing. Tania Itzel Serrano Arévalo

Febrero del 2022

Maestra en Ciencias en Ingeniería Química

Dirigida por: Dr. José María Ponce Ortega y Dr. Luis Fernando Lira Barragán

En el presente proyecto de Tesis se propone un enfoque de programación matemática para la planificación estratégica de la gestión de aguas residuales generadas en las operaciones de fractura hidráulica para la producción de gas *shale*. El enfoque propuesto busca la selección óptima de tratamiento, almacenamiento y reúso basado en el tiempo en que el agua retorna a la superficie. El enfoque también tiene en cuenta la variabilidad de las características de las aguas residuales, incluido el *flowback* y el agua de transición a corto plazo, así como el agua producida a largo plazo. Considerando que los distintos tipos de agua residual tienen diferentes composiciones de contaminantes debido a la combinación de químicos utilizados en la fractura y trazas de sustancias químicas que se encuentran naturalmente en el yacimiento, la segregación de corrientes se considera una opción. Además, el modelo tiene en cuenta las variabilidades estacionales en la disponibilidad de agua fresca. Se consideran objetivos económicos y ambientales, en donde la función objetivo económica determina el costo total, que se compone de los costos de agua fresca, tratamiento, almacenamiento y transporte. El objetivo ambiental se centra en la reducción de los requisitos de agua fresca necesarios para la etapa de fractura, así el modelo propuesto determina las compensaciones entre el costo y consumo de agua. Se presenta un caso de estudio y los resultados muestran que es posible reducir hasta un 32.43% de agua fresca consumida y reutilizar hasta un 12.26% del total de aguas residuales de pozos para necesidades de fracturamiento.

**Palabras Clave:** Optimización, gas *shale*, fractura hidráulica, agua *flowback*, reúso de agua.

## ABSTRACT

### STRATEGIC PLANNING FOR THE OPTIMAL USE OF WASTEWATER IN THE OPERATION OF SHALE GAS FIELDS

by

Ing. Tania Itzel Serrano Arévalo

February 2022

Master in Science in Chemical Engineering

Directed by: Dr. José María Ponce Ortega and Dr. Luis Fernando Lira Barragán

In the present research project, a mathematical programming approach is proposed for the strategic planning of wastewater management generated in hydraulic fracturing operations for shale gas production. The proposed approach seeks the optimal selection of treatment, storage and reuse based on the time that the water returns to the surface. The approach also takes into account variability in wastewater characteristics, including short-term flowback and transition water, as well as long-term produced water. Considering that different types of wastewater have different contaminant compositions due to the combination of chemicals used in fracturing and trace chemicals naturally found in the reservoir, stream segregation is considered an option. In addition, the model takes into account seasonal variabilities in the availability of fresh water. Economic and environmental objectives are considered, where the economic objective function determines the total cost, which is made up of the costs of fresh water, treatment, storage and transportation. The environmental objective focuses on the reduction of the fresh water requirements necessary for the fracturing stage, thus the proposed model determines the trade-offs between cost and water consumption. A case study is presented and the results show that it is possible to reduce up to 32.43% of fresh water consumed and reuse up to 12.26% of the total wastewater from wells for fracturing needs.

**keywords:** Optimization, shale gas, hydraulic fracturing, flowback water, water reuse.

# ÍNDICE

**AGRADECIMIENTOS**

**RESUMEN**

**ABSTRACT**

**ÍNDICE DE FIGURAS**

**ÍNDICE DE TABLAS**

**NOMENCLATURA**

**GLOSARIO**

<b>1. PRESENTACIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.2. ANTECEDENTES .....	2
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	4
1.4. OBJETIVOS .....	5
1.5. HIPÓTESIS .....	6
<b>2. MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>7</b>
2.1. INTRODUCCIÓN .....	7
2.2. YACIMIENTOS .....	7
2.3. FACTORES TÉCNICOS.....	8
2.4. PERFORACIÓN Y FRACTURA HIDRÁULICA .....	9
2.5. INYECCIÓN .....	11
2.6. EL PROBLEMA DEL AGUA Y LA CONTAMINACIÓN .....	13
2.7. OPTIMIZACIÓN .....	14
<b>3. METODOLOGÍA.....</b>	<b>15</b>
3.1. INTRODUCCIÓN .....	15
3.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
3.3. FORMULACIÓN DE OPTIMIZACIÓN PROPUESTA .....	15
3.4. FORMULACIÓN DE MODELO MATEMÁTICO .....	17

<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>34</b>
4.1. INTRODUCCIÓN .....	34
4.2. IMPLEMENTACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	34
4.3. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.....	34
4.4. RESULTADOS.....	42
4.5. DISCUSIÓN Y ANÁLISIS.....	51
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>53</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>55</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>58</b>
CÓDIGO GAMS® .....	58

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. 1. Principales países con reservas de gas <i>shale</i> (EIA).....	2
Figura 2. 1. Yacimientos convencionales y no convencionales. ....	8
Figura 2. 2. Fractura hidráulica de gas <i>shale</i> . ....	10
Figura 2. 3. Proceso de terminación de un pozo (Schlumberger).....	11
Figura 2. 4. Composición de agua inyectada (The Royal Society and The Royal Academy of Engineering).....	11
Figura 2. 5. Proceso de extracción de <i>shale</i> .....	13
Figura 2. 6. Clasificación de agua residual (SEMARNAT). ....	14
Figura 3. 1. Metodología propuesta para evaluar la compensación entre <i>TC</i> y <i>TWR</i> .....	18
Figura 3. 2. Representación esquemática de la superestructura para la gestión del agua.....	19
Figura 4. 1. Consumo de agua fresca en escenario A. ....	45
Figura 4. 2. Consumo de agua fresca en escenario B. ....	46
Figura 4. 3. Consumo de agua fresca en escenario C. ....	46
Figura 4. 4. Consumo de agua fresca en escenario D. ....	47
Figura 4. 5. Curva de compensación <i>TC</i> vs <i>TWR</i> para los escenarios A-D.....	49

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4. 1. Parámetros utilizados en unidades para la gestión de agua (escenario A-D). .....	36
Tabla 4. 2. Costos y eficiencias (escenario A-D). .....	37
Tabla 4. 3. Programación de la fase de finalización en cada pozo en escenario A. ....	39
Tabla 4. 4. Programación de la fase de finalización en cada pozo en escenario B.....	40
Tabla 4. 5. Programación de la fase de finalización en cada pozo en escenario C.....	41
Tabla 4. 6. Programación de la fase de finalización en cada pozo en escenario D. ....	42
Tabla 4. 7. Configuración resultante para cada escenario con un <i>TC</i> mínimo. ....	44
Tabla 4. 8. Agua residual al mínimo <i>TC</i> .....	48
Tabla 4. 9. Número de unidades de almacenamiento y tratamiento existentes. ....	50

## NOMENCLATURA

### Conjuntos

A= {a | a es un reúso de transición}

B= {b | b es un reúso de *flowback*}

C = {c | c es un almacenador *flowback*}

D = {d | d es un almacenador transición}

E= {e | e es un reúso de agua producida}

F = {f | f es una unidad de tratamiento *flowback*}

G = {g | g es un almacenador de agua producida}

M = {m | m es una unidad de tratamiento transición}

N = {n | n es un pozo}

P = {p | p es una unidad de tratamiento para agua producida}

T = {t | t es un periodo de tiempo}

### Subíndices y superíndices

a= Reúso transición

b = Reúso *flowback*

c= Almacenador *flowback*

d= Almacenador transición

e= Reúso producida

f= Unidad de tratamiento *flowback*

g= Almacenador producida

m= Unidad de tratamiento transición

n = Pozo

p= Produced treatment unit

t = Periodo de tiempo

### Variables binarias

$y_f^{treat-flowback}$  = Variable binaria utilizada para modelar la existencia de unidades de tratamiento *flowback*

$y_m^{treat-trans}$  = Variable binaria utilizada para modelar la existencia de unidades de tratamiento transición

$y_p^{treat-prod}$  = Variable binaria utilizada para modelar la existencia de unidades de tratamiento producida

$y_c^{sto-flowback}$  = Variable binaria utilizada para modelar la existencia de unidades de almacenamiento *flowback*

$y_d^{sto-trans}$  = Variable binaria utilizada para modelar la existencia de unidades de almacenamiento transición

$y_g^{sto-prod}$  = Variable binaria utilizada para modelar la existencia de unidades de almacenamiento producida

### **Variables**

$CapCost^{treat-flowback}$  = Costo de capital para unidades de tratamiento *flowback*, \$

$CapCost^{treat-trans}$  = Costo de capital para unidades de tratamiento transición, \$

$CapCost^{treat-prod}$  = Costo de capital para unidades de tratamiento producida, \$

$CapCost^{storage-flowback}$  = Costo de capital para unidades de almacenamiento *flowback*, \$

$CapCost^{storage-trans}$  = Costo de capital para unidades de almacenamiento transición, \$

$CapCost^{storage-prod}$  = Costo de capital para unidades de almacenamiento producida, \$

$Cost^{fresh}$  = Costo de agua fresca, \$

$Cost^{op-treat-flowback}$  = Costos operativos de unidades de tratamiento *flowback*, \$

$Cost^{op-treat-trans}$  = Costos operativos de unidades de tratamiento transición, \$

$Cost^{op-treat-prod}$  = Costos operativos de unidades de tratamiento producida, \$

$Cost^{trans-fresh}$  = Costo de transporte de agua fresca, \$

$Cost^{trans-flowback}$  = Costo de transporte de agua desde el pozo hasta el tratamiento *flowback*, \$

$Cost^{trans-trans}$  = Costo de transporte de agua desde el pozo hasta el tratamiento transición, \$

$Cost^{trans-prod}$  = Costo de transporte de agua desde el pozo hasta el tratamiento producida, \$

$Cost^{trans-treat-reu-flowback}$  = Costo de transporte de agua de tratamiento a reúso *flowback*, \$

$Cost^{trans-treat-reu-trans}$  = Costo de transporte de agua de tratamiento a reúso transición, \$

$Cost^{trans-treat-reu-prod}$  = Costo de transporte de agua de tratamiento a reúso producida, \$

$Cost^{trans-well-sto-flowback}$  = Costo de transporte de agua del pozo a almacenador *flowback*, \$

$\text{Cost}^{trans-well-sto-trans}$  = Costo de transporte de agua del pozo a almacenador transición, \$

$\text{Cost}^{trans-well-sto-prod}$  = Costo de transporte de agua del pozo a almacenador producida, \$

$\text{Cost}^{trans-sto-well-flowback}$  = Costo de transporte de agua de almacenador *flowback* a pozo, \$

$\text{Cost}^{trans-sto-well-trans}$  = Costo de transporte de agua de almacenador transición a pozo, \$

$\text{Cost}^{trans-sto-well-prod}$  = Costo de transporte de agua de almacenador producida a pozo, \$

$ff_{n,t}^{fresh}$  = Flujo de agua fresca segregado a pozos, m<sup>3</sup>/día

$ff_{c,n,t}^{storage-flowback}$  = Flujo segregado del sistema de almacenador *flowback* a los pozos, m<sup>3</sup>/día

$ff_{d,n,t}^{storage-trans}$  = Flujo segregado del sistema de almacenador transición a los pozos, m<sup>3</sup>/día

$ff_{g,n,t}^{storage-prod}$  = Flujo segregado del sistema de almacenador producida a los pozos, m<sup>3</sup>/día

$ff_{f,b,t}^{treat-reu-flowback}$  = Flujo segregado del tratamiento *flowback* a reúso, m<sup>3</sup>/día

$ff_{m,a,t}^{treat-reu-trans}$  = Flujo segregado del tratamiento transición a reúso, m<sup>3</sup>/día

$ff_{p,e,t}^{treat-reu-prod}$  = Flujo segregado del tratamiento producida a reúso, m<sup>3</sup>/día

$ff_{n,f,t}^{well-treat-flowback}$  = Flujo segregado del pozo al tratamiento *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$ff_{n,c,t}^{well-sto-flowback}$  = Flujo segregado del pozo al sistema de almacenador *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$ff_{n,m,t}^{well-treat-trans}$  = Flujo segregado del pozo al tratamiento transición, m<sup>3</sup>/día

$ff_{n,d,t}^{well-sto-trans}$  = Flujo segregado del pozo al sistema de almacenador transición, m<sup>3</sup>/día

$ff_{n,p,t}^{well-treat-prod}$  = Flujo segregado del pozo al tratamiento producida, m<sup>3</sup>/día

$ff_{n,g,t}^{well-sto-prod}$  = Flujo segregado del pozo al sistema de almacenador producida, m<sup>3</sup>/día

$F_{f,t}^{treat-in-flowback}$  = Flujo que ingresa a las unidades de tratamiento *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$F_{m,t}^{treat-in-trans}$  = Flujo que ingresa a las unidades de tratamiento transición, m<sup>3</sup>/día

$F_{p,t}^{treat-in-prod}$  = Flujo que ingresa a las unidades de tratamiento producida, m<sup>3</sup>/día

$F_{f,t}^{treat-out-flowback}$  = Flujo que sale de las unidades de tratamiento *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$F_{m,t}^{treat-out-trans}$  = Flujo que sale de las unidades de tratamiento transición, m<sup>3</sup>/día

$F_{p,t}^{treat-out-prod}$  = Flujo que sale de las unidades de tratamiento producida, m<sup>3</sup>/día

$F_{b,t}^{reu-flowback}$  = Flujo que entra al reúso *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$F_{a,t}^{reu-trans}$  = Flujo que entra al reúso transición, m<sup>3</sup>/día

$F_{e,t}^{reu-prod}$  = Flujo que entra al reúso producida, m<sup>3</sup>/día

$F_{c,t}^{sto-in-flowback}$  = Flujo que ingresa a las unidades de almacenamiento *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$F_{d,t}^{sto-in-trans}$  = Flujo que ingresa a las unidades de almacenamiento transición, m<sup>3</sup>/día

$F_{g,t}^{sto-in-prod}$  = Flujo que ingresa a las unidades de almacenamiento producida, m<sup>3</sup>/día

$F_{c,t}^{sto-out-flowback}$  = Flujo que sale de las unidades de almacenamiento *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$F_{d,t}^{sto-out-trans}$  = Flujo que sale de las unidades de almacenamiento transición, m<sup>3</sup>/día

$F_{g,t}^{sto-out-prod}$  = Flujo que sale de las unidades de almacenamiento producida, m<sup>3</sup>/día

$F_t^{fresh}$  = Flujo de agua fresca, m<sup>3</sup>/día

$F_f^{treat-cap-flowback}$  = Caudal de capacidad de las unidades de tratamiento *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$F_m^{treat-cap-trans}$  = Caudal de capacidad de las unidades de tratamiento transición, m<sup>3</sup>/día

$F_p^{treat-cap-prod}$  = Caudal de capacidad de las unidades de tratamiento producida, m<sup>3</sup>/día

$TWR$  = Requerimientos totales de agua, m<sup>3</sup>

$TC$  = Costo total, \$

$TCC$  = Costo de capital total, \$

$TOC$  = Costo operativo total, \$

$TVC$  = Venta total de agua reusada, \$

$V_{c,t}^{sto-flowback}$  = Volumen de almacenamiento de agua *flowback*, m<sup>3</sup>

$V_{d,t}^{sto-trans}$  = Volumen de almacenamiento de agua transición, m<sup>3</sup>

$V_{g,t}^{sto-prod}$  = Volumen de almacenamiento de agua producida, m<sup>3</sup>

$V_c^{sto-cap-flowback}$  = Capacidad de almacenamiento de agua *flowback*, m<sup>3</sup>

$V_d^{sto-cap-trans}$  = Capacidad de almacenamiento de agua transición, m<sup>3</sup>

$V_g^{sto-cap-prod}$  = Capacidad de almacenamiento de agua producida, m<sup>3</sup>

$\beta_{n,t}^{flowback}$  = Factor de recuperación de aguas residuales tipo *flowback*

$\beta_{n,t}^{trans}$  = Factor de recuperación de aguas residuales tipo transición

$\beta_{n,t}^{prod}$  = Factor de recuperación de aguas residuales tipo producida

## Parámetros

$AvailV_t^{fresh-max}$  = Disponibilidad máxima de agua, m<sup>3</sup>/semana

$FC^{storage-flowback}$  = Costo fijo de unidad de almacenamiento *flowback* en función de costo capital, \$

$FC^{storage-trans}$  = Costo fijo de unidad de almacenamiento transición en función de costo capital, \$

$FC^{storage-prod}$  = Costo fijo de unidad de almacenamiento producida en función de costo capital, \$

$FC^{treat-flowback}$  = Costo fijo de unidad de tratamiento *flowback* en función de costo capital, \$

$FC^{treat-trans}$  = Costo fijo de unidad de tratamiento transición en función de costo capital, \$

$FC^{treat-prod}$  = Costo fijo de unidad de tratamiento producida en función de costo capital, \$

$F_{n,t}^{well-in}$  = Flujo de entrada requerido en pozos, m<sup>3</sup>/día

$F_{n,t}^{well-out-flowback}$  = Flujo de agua *flowback* que sale de los pozos, m<sup>3</sup>/día

$F_{n,t}^{well-out-trans}$  = Flujo de agua transición que sale de los pozos, m<sup>3</sup>/día

$F_{n,t}^{well-out-prod}$  = Flujo de agua producida que sale de los pozos, m<sup>3</sup>/día

$F_f^{treat-max-flowback}$  = Caudal máximo de las unidades de tratamiento *flowback*, m<sup>3</sup>/día

$F_m^{treat-max-trans}$  = Caudal máximo de las unidades de tratamiento transición, m<sup>3</sup>/día

$F_p^{treat-max-prod}$  = Caudal máximo de las unidades de tratamiento producida, m<sup>3</sup>/día

$H^{time}$  = Factor de conversión de tiempo, día/semana

$k_{Ffb}$  = Factor utilizado para anualizar la inversión de unidades para agua *flowback*, año<sup>-1</sup>

$k_{Ftrans}$  = Factor utilizado para anualizar la inversión de unidades para agua transición, año<sup>-1</sup>

$k_{Fprod}$  = Factor utilizado para anualizar la inversión de unidades para agua producida, año<sup>-1</sup>

$UC^{fresh}$  = Costo unitario de agua fresca, \$/m<sup>3</sup>

$UOC_f^{treat-flowback}$  = Costo operativo unitario de las unidades de tratamiento *flowback*, \$/m<sup>3</sup>

$UOC_m^{treat-trans}$  = Costo operativo unitario de las unidades de tratamiento transición, \$/m<sup>3</sup>

$UOC_p^{\text{treat-prod}}$  = Costo operativo unitario de las unidades de tratamiento producida,  $\$/m^3$

$UTC_n^{\text{fresh}}$  = Costo unitario de transporte de agua fresca,  $\$/m^3$

$UTC_{n,f}^{\text{used-flowback}}$  = Costo unitario de transporte de agua *flowback* de pozos a tratamiento,  $\$/m^3$

$UTC_{n,m}^{\text{used-trans}}$  = Costo unitario de transporte de agua transición de pozos a tratamiento,  $\$/m^3$

$UTC_{n,p}^{\text{used-prod}}$  = Costo unitario de transporte de agua producida de pozos a tratamiento,  $\$/m^3$

$UTC_{f,b}^{\text{treat-reu-flowback}}$  = Costo unitario de transporte del tratamiento *flowback* a reúso,  $\$/m^3$

$UTC_{m,a}^{\text{treat-reu-trans}}$  = Costo unitario de transporte del tratamiento transición a reúso,  $\$/m^3$

$UTC_{p,e}^{\text{treat-reu-prod}}$  = Costo unitario de transporte del tratamiento producida a reúso,  $\$/m^3$

$UTC_{n,c}^{\text{well-sto-flowback}}$  = Costo unitario de transporte de pozo a almacenador *flowback*,  $\$/m^3$

$UTC_{n,d}^{\text{well-sto-trans}}$  = Costo unitario de transporte de pozo a almacenador transición,  $\$/m^3$

$UTC_{n,g}^{\text{well-sto-prod}}$  = Costo unitario de transporte de pozo a almacenador producida,  $\$/m^3$

$UTC_{c,n}^{\text{sto-well-flowback}}$  = Costo unitario de transporte de almacenador *flowback* a pozo,  $\$/m^3$

$UTC_{d,n}^{\text{sto-well-trans}}$  = Costo unitario de transporte de almacenador transición a pozo,  $\$/m^3$

$UTC_{g,n}^{\text{sto-well-prod}}$  = Costo unitario de transporte de almacenador producida a pozo,  $\$/m^3$

$UVC_b^{\text{reu-flowback}}$  = Costo unitario de venta de agua a reúso *flowback*,  $\$/m^3$

$UVC_a^{\text{reu-trans}}$  = Costo unitario de venta de agua a reúso transición,  $\$/m^3$

$UVC_e^{\text{reu-prod}}$  = Costo unitario de venta de agua a reúso producida,  $\$/m^3$

$V_c^{\text{sto-max-flowback}}$  = Volumen máximo de almacenador de agua *flowback*,  $m^3$

$V_d^{\text{sto-max-trans}}$  = Volumen máximo de almacenador de agua transición,  $m^3$

$V_g^{\text{sto-max-prod}}$  = Volumen máximo de almacenador de agua producida,  $m^3$

$V_c^{\text{sto-initial-flowback}}$  = Volumen inicial de almacenador de agua *flowback*,  $m^3$

$V_d^{\text{sto-initial-trans}}$  = Volumen inicial de almacenador de agua transición,  $m^3$

$V_g^{\text{sto-initial-prod}}$  = Volumen inicial de almacenador de agua producida,  $m^3$

$VC^{\text{treat-flowback}}$  = Costo variable unitario para la unidad de tratamiento *flowback* en función de costo de capital,  $\$/m^3$

$VC^{\text{treat-trans}}$  = Costo variable unitario para la unidad de tratamiento transición en función de costo de capital,  $\$/m^3$

$VC^{\text{treat-prod}}$  = Costo variable unitario para la unidad de tratamiento producida en función de costo de capital,  $\$/m^3$

$VC^{\text{storage-flowback}}$  = Costo variable unitario para la unidad de almacenamiento *flowback* en función de costo de capital,  $\$/m^3$

$VC^{\text{storage-trans}}$  = Costo variable unitario para la unidad de almacenamiento transición en función de costo de capital,  $\$/m^3$

$VC^{\text{storage-prod}}$  = Costo variable unitario para la unidad de almacenamiento producida en función de costo de capital,  $\$/m^3$

$\alpha_f^{\text{treat-flowback}}$  = Factor de eficiencia volumétrica de la unidad de tratamiento *flowback*

$\alpha_m^{\text{treat-trans}}$  = Factor de eficiencia volumétrica de la unidad de tratamiento transición

$\alpha_p^{\text{treat-prod}}$  = Factor de eficiencia volumétrica de la unidad de tratamiento producida

## GLOSARIO

**Lutita:** roca sedimentaria formada por la consolidación de partículas del tamaño de la arcilla y el limo en capas relativamente impermeables de escaso espesor.

**Fracking:** conocido como fractura hidráulica, es una técnica que permite extraer el llamado gas *shale*.

**Agua residual:** Son las provenientes de actividades domésticas, industriales, comerciales, agrícolas o de cualquier otra actividad que, por el uso de que han sido objeto, contienen materia orgánica y otras sustancias químicas que alteran su calidad original.

**Agua residual tratada:** Son aquellas que mediante procesos individuales o combinados de tipo físicos, químicos, biológicos u otros, se han adecuado para hacerlas aptas para su reúso en otras actividades.

**Costo operativo:** costos de operación o costos de funcionamiento del proyecto son aquellos que ocurren luego del inicio, construcción o instalación de la nueva capacidad productiva hasta la finalización de su vida útil.

**Costo de capital:** es un gasto para crear un beneficio en el futuro, costo extendido sobre la vida útil del activo, por lo que no se registra de una sola vez.

**Modelo determinista:** Es un modelo matemático donde las mismas entradas o condiciones iniciales producirán invariablemente las mismas salidas o resultados, no contemplándose la existencia de azar, o incertidumbre en el proceso modelado mediante dicho modelo.

**Programación lineal entera mixta:** MILP, por sus siglas en inglés.

**Sistema de modelado algebraico general:** GAMS, por sus siglas en inglés.

**TC:** Costo total.

## CAPÍTULO I

### 1. PRESENTACIÓN

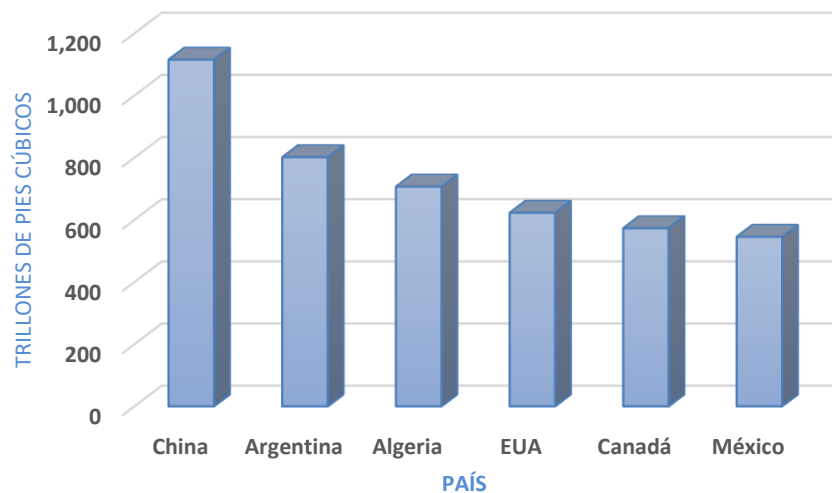
#### 1.1. Introducción

El gas natural es una mezcla de hidrocarburos simples que se encuentra en estado gaseoso, en condiciones ambientales normales de presión y temperatura. Se compone principalmente de gas metano en 95%, con cantidades variables de etano, propano, butano y otros gases [1]. Es ampliamente utilizado a nivel mundial en los sectores eléctrico, petrolero, industrial, residencial, servicios y transporte.

En la actualidad, el consumo de energía eléctrica es una necesidad básica. La energía eléctrica es un insumo primario para la realización de las actividades productivas, de transformación y servicios en el país, como son el abastecimiento de alimentos, comunicaciones, transporte, casas habitación, industrias, entre otras. Garantizar el abasto de electricidad de forma continua y segura, permite el acceso a bienes y servicios básicos, como la alimentación, salud y educación, lo cual incide directamente en el bienestar y calidad de vida de la población. El suministro eficiente de energía eléctrica a un costo accesible promueve la competitividad y la capacidad de las empresas e industria para ofrecer más y mejores productos y servicios en el mercado, lo que tiene un impacto directo en el crecimiento económico. La forma de obtención de energía eléctrica se encuentra mayormente relacionada con energías convencionales, cabe mencionar que algunas utilizan combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural) con lo que pronto estará llegando a su fin, debido a la explotación incontrolada de dichas fuentes.

Como es de esperar el consumo de energía global aumentará en los próximos años (EIA). En este sentido, nuevas formas de energía como el gas *shale*, gas *tight* y las llamadas energías renovables contribuirán significativamente para poder satisfacer estas demandas de energéticos a nivel mundial. Dentro de los países con mayor interés en la explotación de gas *shale* se encuentra Estados Unidos de América (EUA), el cual cuenta con sus principales reservas en Texas. Lo anterior fue consecuencia de que el país registró el mayor crecimiento en la demanda mundial de gas natural. En un análisis publicado por la administración de información energética de EUA, se estimó que las reservas probadas mundiales de gas fueron de 7,576.6 trillones de pies cúbicos [2] y las reservas contabilizadas en México de 545.2 Tcf (trillones de pies cúbicos). En dicho

documento se ubica a México en el sexto lugar de reservas de este hidrocarburo no convencional, arriba están Canadá con 572.9 Tcf, EUA con 622.5, seguido de Argelia 706.9 Tcf, Argentina 801.5 Tcf y China con 1,115.2 Tcf (ver **Figura 1.1**). Por otro lado, se ha repostado los cinco principales estados productores de gas natural y su participación en la producción total de gas natural de EUA para 2020, en donde Texas ha aportado el 23.9%, seguido de Pensilvania con un 21.1%, Louisiana con un 9.5%, Oklahoma 7.6% y West Virginia con 7.1% [3].



**Figura 1. 1. Principales países con reservas de gas *shale* (EIA).**

## 1.2. Antecedentes

Los recientes descubrimientos de reservas sustanciales de gas *shale* han tenido un impacto significativo en la cartera de energía [4] que podría beneficiar directamente a la planificación de la energía eléctrica [5]. Por ejemplo, se espera que, en los EUA, el porcentaje de energía derivada del gas *shale* aumente de 20 % en 2020 a aproximadamente 37% en 2050 [6]. Sin embargo, la mayoría de los países del mundo no cuentan actualmente con la infraestructura necesaria para la producción a gran escala de gas no convencional [7] debido a la complejidad de su producción, tratamiento y distribución. Durante el proceso de fractura hidráulica, se inyectan grandes cantidades de agua, sin embargo, a pesar de que la fractura podría representar independencia energética, la preocupación por los recursos hídricos está aumentando debido al uso intensivo de agua fresca en términos de contaminación potencial, por lo que se ha convertido en un recurso

escaso, particularmente en áreas geográficas propensas al agua [8]. Además, a medida que la demanda de agua aumenta e incluso supera el total de recursos renovables de agua fresca, la escasez de agua se ha convertido en uno de los mayores riesgos para el desarrollo sostenible global, amenazando la seguridad alimentaria, la salud humana, el desarrollo socioeconómico y los ecosistemas [9]. La investigación se ha centrado en la evaluación de los requisitos de agua asociados con la fractura hidráulica y su disponibilidad [10]. Las características de las aguas residuales de gas *shale* impactan en la selección de opciones de tratamiento y almacenamiento para minimizar su impacto ambiental [11]. Diferentes tecnologías (destilación por membranas, ósmosis directa y compresión mecánica de vapor) han sido consideradas las más adecuadas para agua con alta salinidad en el tratamiento de aguas residuales de gas *shale* [12]. Otros estudios han abordado propiedades físicas más específicas como la composición mineral, la interacción agua-esquistos (que es el proceso responsable del daño estructural cuando el agua y el gas *shale* interactúan), reacciones agua-roca versus mezcla de fluidos de yacimiento en concentración química [13] y los mecanismos que controlan la química del agua de retorno [14]. Varias técnicas de optimización se han utilizado en la planificación de la gestión del agua como modelos híbridos con técnicas deterministas y metaheurísticas [15], optimización jerárquica para la asignación de recursos [16], modelos de gestión de aguas residuales de fracturamiento estocástico [17].

Las características del agua residual de gas *shale* juegan un papel importante en el diseño de estrategias de gestión del agua. Tras la inyección de agua  $F_t^{fres}$  en la fractura hidráulica, las aguas residuales iniciales que regresan se denominan "*flowback*" (que contiene contaminantes lixiviados y productos químicos utilizados en la preparación del fluido de fractura). A continuación, las aguas residuales se denominan "agua de transición" (que incluye algunos contaminantes en concentraciones moderadas) y, en última instancia, se genera "agua producida" (que está contaminada por sólidos disueltos totales (TDS), torio, metales, compuestos orgánicos volátiles (COV) como benceno y tolueno [18] y sustancias radiactivas como uranio, radio 226 y 228 [19] entre otras). Debido al impacto significativo de las características del agua residual en el desarrollo de una estrategia óptima de manejo a largo plazo, este trabajo propone un enfoque de optimización para la minimización simultánea de uso de agua fresca y el costo mínimo involucrado en la fractura hidráulica para la extracción de gas *shale*, considerando los diferentes tipos de corrientes de aguas residuales que dependen del momento en que regresan a la superficie: *flowback*, transición y agua producida. El enfoque propuesto evita la mezcla de

diferentes tipos de aguas residuales para mejorar su reúso. El modelo de optimización presentado selecciona el conjunto de diferentes tecnologías de tratamiento, reúsos, almacenadores y capacidades necesarias para el correcto funcionamiento del proyecto. La programación o cronograma se selecciona para la explotación de un conjunto de pozos, en donde se determinan los períodos de tiempo en los que se llevará a cabo la fractura hidráulica para cada uno de los pozos que se pretenden fracturar, es decir, se fracturan simultáneamente en un periodo de tiempo específico, durante el proceso de fractura se requieren grandes cantidades de agua fresca y una vez terminado el proceso un porcentaje de agua retorna a la superficie (agua residual). La formulación de optimización multi-objetivo aborda el objetivo ambiental a través de la minimización de los requisitos totales de agua fresca del proceso de fractura hidráulica. El agua residual que regresa, se almacena para su recirculación a otro pozo que se fracture simultáneamente y la cantidad que no se requiere se manda a unidades de tratamiento. El modelo considera las limitaciones asociadas con el agua fresca disponible en diferentes estaciones durante el año.

### **1.3. Justificación**

De acuerdo a la demanda energética que año con año va en aumento, debido al aumento de la población, así como a la industrialización y crecimiento del país en general, es importante considerar los energéticos utilizados ya que la forma de obtención de energía eléctrica se encuentra mayormente ligada a energías convencionales, cabe mencionar que algunas utilizan combustibles fósiles (petróleo, carbón, gas natural) con lo que pronto estará llegando a su fin, debido a la explotación incontrolada de dichas fuentes. Recientemente se ha anunciado el descubrimiento de importantes yacimientos de gas natural de lutitas conocido como gas *shale*. Se trata de un tipo de gas no convencional cuya explotación se presenta como relevante siendo un complemento de las fuentes de energía actualmente usadas. Al explotar este tipo de pozos no convencionales se utiliza una mezcla de químicos, arena y agua para facilitar la perforación de las capas en las cuales se encuentra el energético, pero el principal problema radica en la cantidad excesiva de agua inyectada durante la fractura, por lo que la contaminación de los recursos hídricos a consecuencia de los procesos de extracción de este gas sumando a ello la contaminación de mantos acuíferos es realmente crítica. Debido a lo anterior, se busca disminuir la cantidad de agua contaminada por medio de tratamientos óptimos, es necesario analizar los costos totales involucrados para cada caso en los cuales se consideran costo de plantas tratadoras

de agua, capacidad de cada planta, costos de operación y mantenimiento, costos unitarios, entre otros. Más allá del descubrimiento de yacimientos de gas natural no convencional se representa una ventaja económica e independencia en términos energéticos al producir gas natural sin la necesidad de importación de otros países y, por otro lado, un reto ambiental cuyo impacto principal será en el manejo y utilización del agua.

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

Desarrollar un modelo matemático para el manejo óptimo del agua residual en los pozos de gas *shale*, así como determinar el costo mínimo para el agua fresca, el tratamiento y almacenamiento. Además de contemplar aspectos ambientales en el uso de agua fresca y reúso de agua tratada.

### 1.4.2. Objetivos particulares

- Generar una superestructura y casos de estudio de la misma.
- Desarrollar un modelo de optimización sobre la planificación estratégica para el tratamiento de agua residual en la extracción de gas *shale*. Contemplando las interacciones y restricciones descritas en la superestructura.
- Considerar como caso específico Texas y Pensilvania, realizando distintas planeaciones de explotación de pozos.
- Especificar la calendarización en la fractura hidráulica de un conjunto de pozos.
- Considerar los aspectos económicos para satisfacer la producción de gas, así como el impacto ambiental que se genera.
- Contemplar disponibilidad de agua en el pozo de extracción, el agua requerida durante el proceso de fractura hidráulica y el agua residual de dicho proceso.
- Minimizar impacto ambiental y aspectos económicos.
- Dirigir la función objetivo a la minimización del costo total  $TC$  y consumo de agua fresca  $TWR$ .
- Analizar los casos de estudio resultantes de la optimización.

### 1.5. Hipótesis

El uso de la formulación de programación matemática, así como la superestructura propuesta que considera un equilibrio económico-ambiental, permitirán estimar la predicción del costo total ( $TC$ ) para satisfacer la producción de gas *shale* considerando los requisitos de agua utilizada, así como el tratamiento de agua residual durante la fractura hidráulica. Dicho modelo propondrá el arreglo adecuado de la red de agua que deberá utilizarse para cubrir la producción y extracción de gas especificado, incorporando un enfoque de reúso de agua residual para evaluar la asignación del recurso de manera sostenible.

## CAPÍTULO II

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Introducción

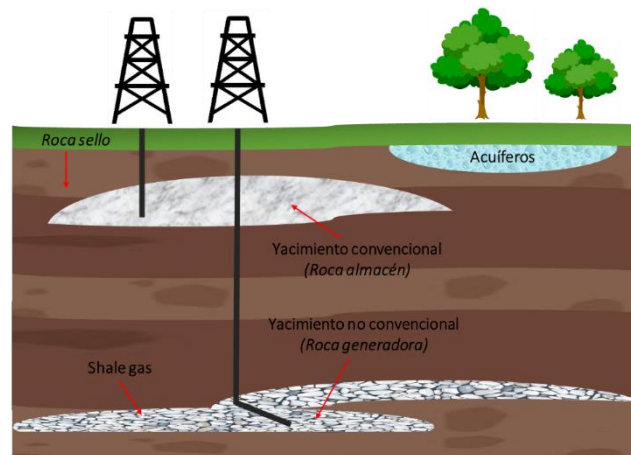
En el presente capítulo se discuten los conceptos que definen el siguiente trabajo de investigación, con el fin de abundar a cerca de la información básica para el entendimiento de los siguientes capítulos. Se discuten las distintas etapas en el proceso de obtención de gas *shale*, lo que nos permitirá construir un modelo que se describe en los siguientes capítulos.

#### 2.2. Yacimientos

La producción y exploración de gas se clasifica en yacimientos convencionales y no convencionales. Considerando las características geológicas, en los yacimientos convencionales el gas se encuentra atrapado en una estructura de roca porosa limitada por una capa de roca impermeable que evita que el gas escape a la superficie. Los yacimientos no convencionales son más extendidos y consisten en una acumulación de capas sedimentarias de baja permeabilidad que atrapan el gas entre ellas [1]. El gas *shale* se encuentra en yacimientos compuestos predominantemente por esquisto bituminoso, pizarra bituminosa o lutita bituminosa, en términos geológicos se distingue respecto a su contraparte convencional en la que se encuentra en yacimientos rocosos que difieren principalmente en las condiciones de porosidad y permeabilidad. Esta última característica (menor permeabilidad para el caso no convencional) implica el uso de tecnología de extracción que combina la perforación vertical, horizontal y un procedimiento denominado fractura hidráulica a una profundidad promedio superior a la de los yacimientos convencionales [18].

Un sistema petrolero consta de elementos geológicos: roca generadora (roca más profunda en la que se descompone materia orgánica, en ella se depositaron y compactaron sedimentos por años), roca almacén (cierta cantidad de materia orgánica de la roca generadora migra por medio de fisuras a la roca almacén, se caracteriza por tener la suficiente permeabilidad para permitir la entrada de la materia orgánica) y roca sello (es un espacio con muy baja permeabilidad por lo que “sella” la salida de materia orgánica al no permitir el flujo de ésta, que finalmente constituye una trampa petrolera) (ver **Figura 2.1**). El interior de la lutita presenta baja permeabilidad (lo que impide su ascenso natural a la superficie) y alta cantidad de materia orgánica, en términos

geológicos se encuentra en zonas profundas como son la roca generadora a diferencia de otro tipo de rocas sedimentarias convencionales que se encuentran en la roca almacén, con características de porosidad y permeabilidad distintas. Para la extracción de gas *shale* es necesaria la aplicación de nuevas tecnologías y fracturar la roca hidráulicamente.



**Figura 2. 1. Yacimientos convencionales y no convencionales.**

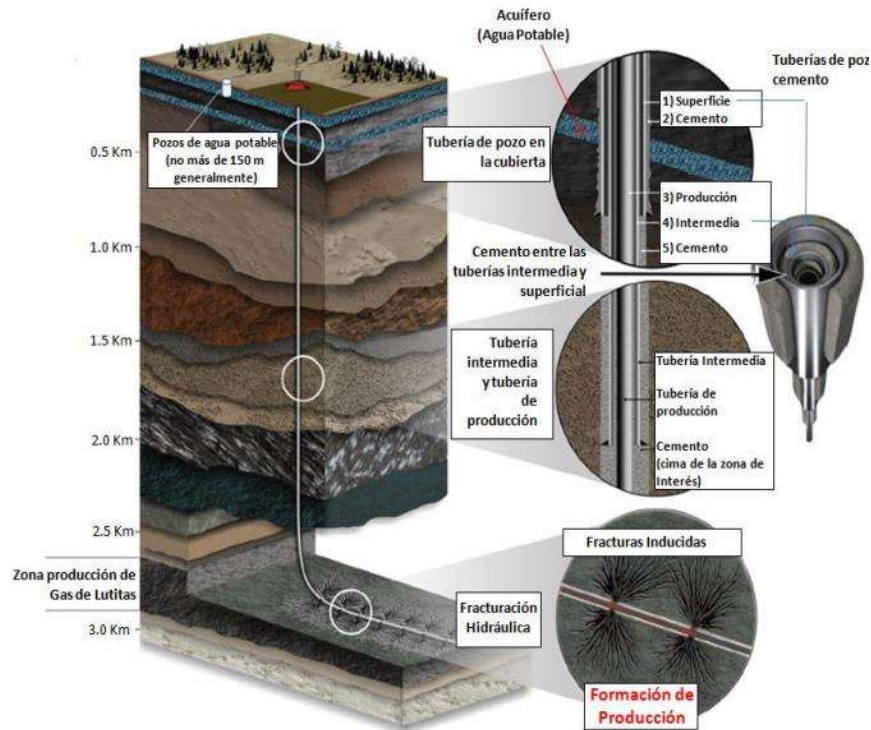
### 2.3. Factores técnicos

Los yacimientos de gas de lutitas necesitan de características específicas de carbón orgánico, madurez térmica, espesor de la roca, porosidad, profundidad y presión. En EUA se reúnen características geológicas favorables que no necesariamente se observan en otros países. Se dispone de estudios que muestran la ubicación de los recursos, identificando los que pueden ser realmente productivos, lo cual da más certidumbre a la industria y permite a los productores optimizar sus proyectos. Se debe considerar la existencia de una adecuada infraestructura de transporte asociada a la explotación del gas de lutitas, desde las áreas productoras hasta los centros de consumo. Por otro lado, está la existencia de un fuerte sector de servicios, de tecnologías y equipos industriales relacionado con el sector petrolero. Todo eso ha apoyado los requerimientos de la exploración y producción de gas *shale*, la cual demanda múltiples perforaciones, fracturas, una intensa movilización de personal, plataformas, equipos de presión, tuberías de perforación, equipos de transporte de agua y fluidos, tanques de almacenamiento, etc. Al mismo tiempo, esos sectores y actividades se han visto impulsados por la producción de gas *shale* contribuyendo al empleo y economía de EUA [1]. Un factor más a considerar: la disponibilidad de agua es de gran importancia, ya que es esencial para mantener abierta la fractura y que el gas fluya de la roca.

## 2.4. Perforación y fractura hidráulica

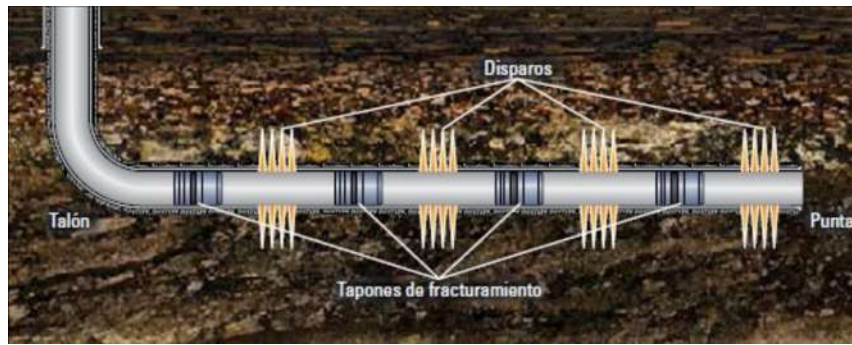
El proceso de fractura hidráulica o *fracking* fue introducido en la industria de la explotación de hidrocarburos en 1940 en EUA por la compañía Halliburton; sin embargo, el método cobra relevancia a partir de 1986 cuando es usado por primera vez en Texas en la cuenca de gas de lutitas Barnett, que cubre veinticuatro condados y está ubicada en la parte centro norte del estado, en las inmediaciones de la ciudad de Dallas [18]. Barnett Shale, como se conoce, resultó un área de prueba a partir de la cual la aplicación de fractura hidráulica, en conjunto con la técnica de perforación horizontal, han permitido el desarrollo de la industria a lo largo del territorio estadounidense [18]. El proceso de extracción para un pozo productor comercial comienza con la etapa de perforación vertical, que se realiza a una distancia promedio de entre 1,000-5,000 m, más allá de los cuerpos subterráneos de agua que se localizan a una distancia de entre 10-300 m [18] (ver **Figura 2.2**), en la perforación se hace uso de una herramienta denominada barrena o broca de perforación, que sirve para taladrar la roca. La siguiente etapa es la perforación horizontal, que cubre una distancia promedio de 1,600 metros [20]. Para minimizar el riesgo de contaminación se introduce en el pozo una tubería de acero desde la superficie hasta el final del pozo y posteriormente se inyecta cemento entre el espacio que queda entre la tubería y las paredes del pozo, de tal suerte que el pozo queda aislado de todas las rocas y acuíferos que haya atravesado (*casing*).

El *casing* o entubado es un aspecto fundamental a la hora de diseñar un pozo, ya que las cargas que tiene que soportar la superficie del pozo son mayores que en un pozo convencional. También hay que añadir que durante la estimulación hidráulica las paredes del entubado se ven sometidas a grandes esfuerzos, además de las cargas, otros factores a tener en cuenta son la erosión y corrosión que puede sufrir el entubado. Asegurado el aislamiento del pozo, el siguiente paso consiste en el proceso de estimulación mediante la fractura hidráulica (*fracking*).



**Figura 2. 2. Fractura hidráulica de gas shale.**

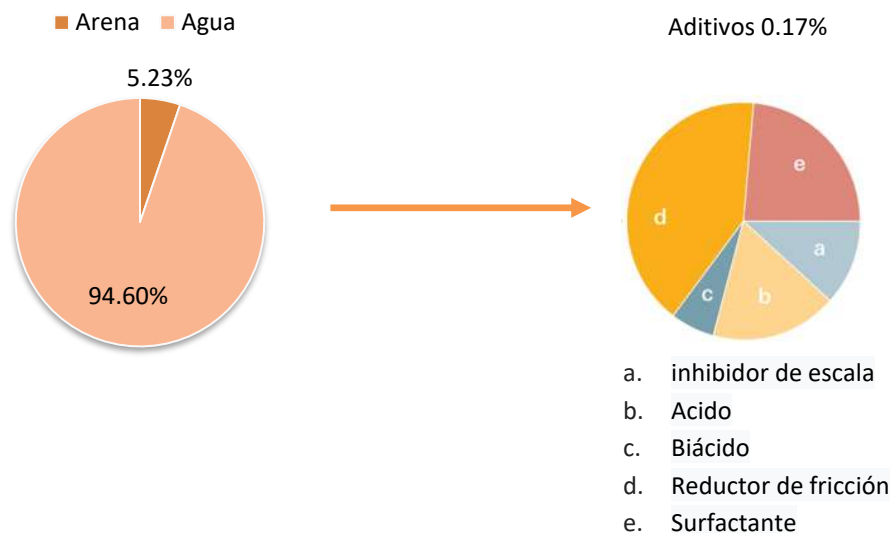
La terminación de un pozo debe ser realizada teniendo en cuenta el posterior tratamiento por *fracking* que debe llevarse a cabo en la formación. La terminación implica un proceso multietapa, en el que en cada etapa se realizan las perforaciones a través del acero y cemento por medio de cargas explosivas o disparos, seguido de un aislamiento de cada etapa con tapones de fracturamiento o *packers* (ver **Figura 2.3**). Los agujeros realizados conectan la línea de producción directamente con la formación de *shale*, y por estos agujeros se introducirá posteriormente el fluido a presión que creará las fracturas que primero serán microfisuras para estimular la producción. El pozo se termina en distintas etapas, en las que tienen lugar a la fractura hidráulica, y el número de etapas depende en cada caso. El resultado es un pozo con varios tramos perforados por medio de disparos por agujeros que comunican con la formación, y aislados entre ellos por *packers* que serán retirados al final de la inyección.



**Figura 2. 3. Proceso de terminación de un pozo (Schlumberger).**

### 2.5. Inyección

La fase de inyección consiste en introducir el fluido de fractura a alta presión (20,000 psi aprox.) a través del pozo con la finalidad de generar grietas en la zona de rocas que contienen el gas; la composición de este flujo puede variar entre los sitios. Al respecto, según la compañía Halliburton, que tiene operaciones cerca de la frontera con México en la cuenca de Ford Shale en Texas, señala que este flujo se compone por 94.60% de agua y 5.4% en compuestos químicos y arena (ver **Figura 2.4**) [18]. En esta fase, los riesgos principales son: la contaminación de los cuerpos de agua subterráneos mediante la filtración de las sustancias químicas o la migración del gas hacia los cuerpos de agua subterráneos.

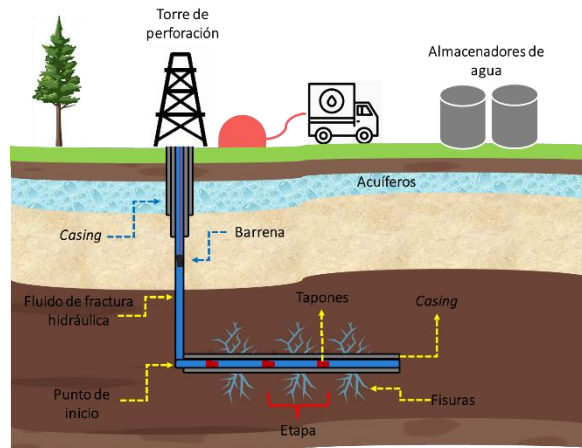


**Figura 2. 4. Composición de agua inyectada (The Royal Society and The Royal Academy of Engineering).**

El fluido de fractura hidráulica contiene agua fresca (agua limpia, proveniente de lagos, ríos, fuentes subterráneas o de proveedores locales) [18], agente apuntalante o sostén (arena inerte) y compuestos químicos, como:

- Ácidos: su principal uso en este caso es para disolver minerales.
- Desinfectantes: Previene el crecimiento de bacterias.
- Reductores de fricción: Reducen las fuerzas de fricción que se crean durante la perforación, ya que, al descender el agua por la tubería de manera vertical y después horizontal, pierde presión.

La mezcla de químicos contiene cientos de aditivos, las cantidades exactas en las mezclas se manejan como información comercial confidencial. Las características del fluido deben ser capaces de generar la suficiente presión para fisurar la roca, tener densidad y viscosidad apropiadas para transportar el apuntalante, la eficiencia del fluido está dada por la relación entre la cantidad de fluido inyectado y el que permanece en las fracturas, a eficiencias altas se consigue retener suficiente apuntalante en la grieta creada, generando así fracturas que no cerraran tras el retiro del fluido. El proceso de *fracking* conlleva el uso de cantidades excesivas de agua fresca que van de 8,000-27,000 m<sup>3</sup> [12] por pozo. Una vez terminadas las etapas que comúnmente van de 5 a 30, serán retirados los tapones, en seguida cierta cantidad de agua retornará a la superficie y a medida que se reduce, comienzan a fluir los hidrocarburos, permitiendo que el gas y el petróleo atrapados entre la lutita escape del pozo (la producción de estos pozos es de 20-40 años) [10]. Al terminar el proceso de *fracking*, el pozo es conectado a un gaseoducto y comienza a producir. Cuando la vida útil del pozo llega a su fin, se rellena con cemento y se asegura la perforación con tapones especiales, para dejar el área a disposición de alguna otra actividad (ver **Figura 2.5**).

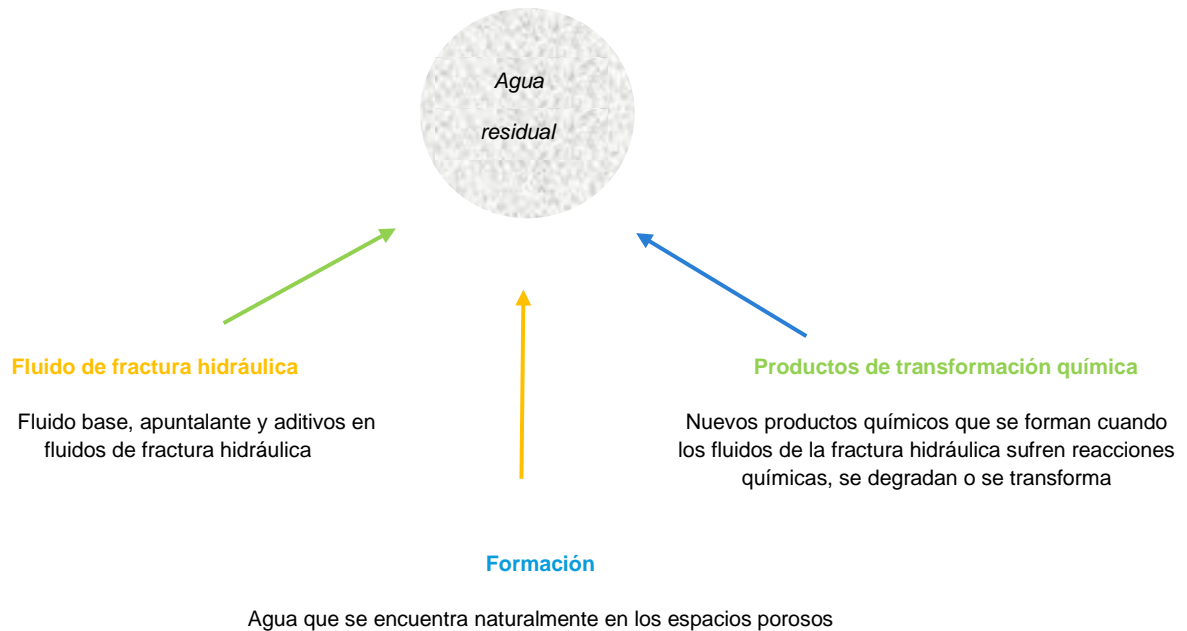


**Figura 2. 5. Proceso de extracción de shale.**

## 2.6. El problema del agua y la contaminación

Uno de los principales problemas que genera la producción del gas de lutitas es la gran cantidad de agua que demanda. En términos generales, mientras la perforación convencional demanda agua para enfriar y lubricar el cabezal de perforación, así como eliminar el lodo resultante, la fractura hidráulica demanda alrededor de diez veces más. El agua residual es un fluido que se recupera después del *fracking*. Alrededor de un 10-50% es retornado en distintos periodos de tiempo, lo que equivale a un volumen de entre 1,500 y 10,500 m<sup>3</sup>, va a depender de la naturaleza, ubicación y edad del pozo; contiene trazas de materiales de las capas rocosas como son sustancias radioactivas (radio 226 y 228) [19], uranio, torio, compuestos orgánicos (benceno, tolueno, queroseno, xilenos) [18], sales (Cl, Br, SO<sub>4</sub>, Na, Mg, Ca, etc.) y metales (Ba, Mn, Fe, Sr, etc.). El agua residual se puede generalizar en una mezcla de los siguientes tres tipos de líquidos: fluido de fractura hidráulica, fluido de formación (agua que se encuentra naturalmente en las formaciones rocosas, puede contener metales, materiales radiactivos e hidrocarburos) y fluido de transformación química (nuevos productos químicos que se forman por reacciones químicas) (ver **Figura 2.6**). El agua residual también puede contener pequeñas cantidades de compuestos químicos inyectados en un pozo como parte de una fractura hidráulica o para evitar la obstrucción del pozo por escamas o bacterias. Casi toda el agua residual se inyecta bajo tierra, el resto se trata para su reutilización o se descarga en la superficie. Estas aguas que retroceden a través de la boca del pozo con el gas representan una corriente que debe gestionarse. La reducción de la concentración de sólidos disueltos totales (TDS) es la consideración principal para tratar el agua residual con una calidad adecuada para descarga o para reúso externo. Reducir el potencial de

incrustación del agua y que sea desalinizada es posible al usar destilación de membrana, ósmosis, compresión mecánica de vapor, entre otras tecnologías. Cabe resaltar que las tecnologías a utilizar son específicas ya que el alto contenido de salinidad del agua producida es demasiado alto.



**Figura 2. 6. Clasificación de agua residual (SEMARNAT).**

## 2.7. Optimización

La optimización tiene como propósito analizar e identificar la mejor solución posible, entre todas las soluciones potenciales. La idea de aplicar los diferentes métodos de optimización es facilitar el rendimiento y el manejo de los parámetros que componen un sistema o proceso. A través de la optimización se pueden resolver una amplia variedad de problemas en el diseño, construcción, operación y análisis de plantas químicas (así como de muchos otros procesos industriales). Esta técnica es una de las principales herramientas cuantitativas en la toma de decisiones industriales. Se ocupa en seleccionar el mejor entre un sistema entero mediante métodos cuantitativos eficientes. Las computadoras y el software asociado hacen que los cálculos necesarios sean factibles y rentables. Sin embargo, para obtener información útil al utilizar computadoras se requiere: un análisis crítico del proceso o diseño, visión sobre cuáles son los objetivos que se deben lograr y el uso de experiencias pasadas. La optimización incluye el descubrimiento de los "mejores valores" de alguna función objetivo dado un dominio definido, incluyendo una variedad de diferentes tipos de funciones objetivo y diferentes tipos de dominios.

## CAPÍTULO III

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. Introducción

En el presente capítulo se plantea el problema abordado y el procedimiento con el cual se aborda la gestión de agua en la producción de gas *shale*, en la sección tres se describen las características de la optimización con lo que en la sección siguiente se plantean una superestructura para formular relaciones matemáticas necesarias modelando los aspectos económicos y las limitaciones para el agua disponible en la fuente fresca, así como los costos asociados con la gestión del agua involucrada en la industria del gas *shale*.

#### 3.2. Planteamiento del problema

Para cumplir con los requerimientos energéticos se considera la explotación de yacimientos de gas *shale*, lo que conlleva a cantidades excesivas de agua contaminada produciendo un impacto ambiental importante. Por lo que, en este trabajo se pretende encontrar y evaluar el arreglo óptimo que debe existir en el agua residual para que genere menor impacto en el medio ambiente y se encuentre la opción más adecuada económicamente hablando, considerando el caso específico de Texas y Pensilvania. También se busca un enfoque integrador que gestione el uso de agua residual en otras áreas como son biocombustibles, cultivos de algas y agua de enfriamiento en plantas de potencia, promoviendo la eficiencia del uso de los recursos naturales.

#### 3.3. Formulación de optimización propuesta

El problema abordado por este documento se puede describir de la siguiente manera:

Dado:

- Un conjunto de pozos ( $n = 1, 2, \dots, N$ ) a completar (mediante operaciones de fracturamiento hidráulico) según una programación fija donde pueden participar una o varias tripulaciones (equipos) de *fracking* (es decir, es posible completar simultáneamente varios pozos).
- Una enorme fuente de agua fresca para satisfacer las grandes necesidades de agua en las operaciones de gas *shale*. Es necesario proporcionar el costo unitario de adquisición y transporte de agua fresca.

- Varias tecnologías de tratamiento para limpiar todas las corrientes de agua que regresan a la superficie; por lo tanto, de acuerdo con el tiempo (una vez que termina la etapa de finalización), las aguas residuales se clasifican en *flowback*, transición y agua producida. En este sentido, se da un conjunto de tecnologías de tratamiento para el *flowback* ( $f = 1, 2, \dots F$ ), también para el agua de transición ( $m = 1, 2, \dots M$ ), e incluso para el agua producida ( $p = 1, 2, \dots P$ ). Además, se requiere conocer las eficiencias para remover los contaminantes, los costos operativos unitarios y los costos unitarios fijos y variables.

- Además, un conjunto de tanques para el *flowback* ( $c = 1, 2, \dots C$ ), agua de transición ( $d = 1, 2, \dots D$ ), y agua producida ( $g = 1, 2, \dots G$ ) debe instalarse para almacenar agua recirculada, proveniente de los pozos fracturados. Cada tanque tiene asociado un costo fijo y variable, así como un volumen máximo para cada almacenamiento de la unidad fija.

- También hay un conjunto de usos potenciales para el agua tratada de *flowback* ( $b = 1, 2, \dots B$ ), agua de transición ( $a = 1, 2, \dots A$ ) y agua producida ( $e = 1, 2, \dots E$ ), donde las aguas residuales tratadas se pueden utilizar en otra actividad donde la calidad del agua es aceptable.

- Además, un conjunto de reúsos para cada tipo de corrientes de aguas residuales (es decir, *flowback*, transición y producidas) de acuerdo con sus condiciones de calidad. En cada caso, se debe conocer el precio de venta.

- Finalmente, se requiere el costo unitario de transporte para todas las trayectorias (pozos-tratamientos, tratamientos-reúso, pozos-almacenamiento y almacenamiento-pozos).

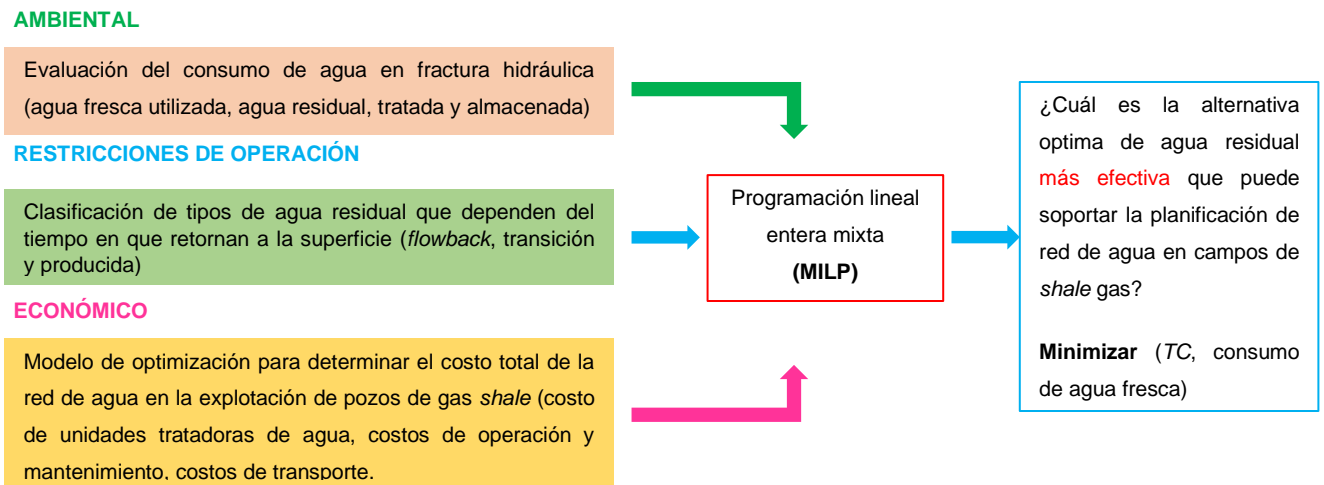
Por tanto, el problema consiste en determinar la configuración óptima de gestión del agua para llevar a cabo la fase de finalización en campos de gas *shale* considerando objetivos económicos (minimizando el costo total) y ambientales (minimizando el consumo de agua fresca). Una vez implementado y resuelto el enfoque propuesto, se determinará el número y capacidades de tecnologías de tratamiento (para cada tipo de agua residual que regresa a la superficie), unidades de almacenamiento y reúsos requeridos en la solución óptima, así como los flujos internos. El costo total ( $TC$ ) está compuesto por el costo operativo total ( $TOC$ ), el costo total de capital ( $TCC$ ) y los ingresos generados por la venta de corrientes de aguas residuales para ser reusadas ( $TVC$ ). El  $TOC$  incluye los costos de agua fresca, los costos operativos de las unidades de tratamiento y los costos de transporte de las trayectorias; mientras que el  $TCC$  considera los costos asociados con la adquisición de unidades de tratamiento y almacenamiento, y el  $TVC$  representa la venta total del agua tratada para reúso.

Además, una característica novedosa presentada en este trabajo está relacionada con la segregación del tipo de corrientes de aguas residuales captadas y enviadas a las tecnologías de tratamiento; donde no se permite mezclar agua *flowback*, de transición o producida evitando que corrientes limpias o pobres (en términos de contaminación) se mezclen con corrientes ricas, lo que puede incrementar los costos de tratamiento. Este tipo de pozos no convencionales concentran la mayor parte de la producción de gas natural en los primeros años (comenzando con una notable disminución en el primero de ellos) [21]. No obstante, de acuerdo con el período de tiempo  $t$  (para volver a la superficie), las corrientes de agua se clasifican como aguas *flowback*, transición y producidas. El agua de *flowback* regresa las siguientes 3 semanas después de que se completa la fractura hidráulica; mientras que el agua de transición regresa las siguientes 12 semanas una vez que se captura toda el agua *flowback* y finalmente el agua producida regresa las próximas 17 semanas después de terminada el agua de transición. Adicionalmente, el agua de *flowback* representa el 20.59% del total de agua inyectada, mientras que la de transición es el 12.13% y el agua producida el 6.58% del total de requerimientos hídricos [22]. El reúso de los arroyos de aguas residuales representa un recurso valioso para reducir el consumo de agua fresca e incluso el costo total asociado con el proyecto. Otras características relevantes, para desarrollar una metodología adecuada que considere los aspectos antes mencionados son: el número total de pozos (por completar) para un determinado campo y un conjunto de tripulaciones de fracturamiento hidráulico (cada una con el equipo requerido) disponibles para realizar la operación durante un horizonte temporal fijo (toda la información previa debe ser proporcionada antes de la implementación de la metodología propuesta). Finalmente, los aspectos que representan aportes significativos respecto a intentos previos son la consideración de los diferentes tipos de aguas residuales que regresan a la superficie (*flowback*, transición y agua producida) y los diferentes reúsos evitando la disposición final de las aguas residuales (generado beneficios económicos y ambientales).

### 3.4. Formulación de modelo matemático

La metodología propuesta consiste en un conjunto de relaciones matemáticas que modela el objetivo del proyecto. Se incorporan algunas opciones para el reúso del agua, como riego de cultivos para biocombustibles, cultivo de algas y agua de enfriamiento en plantas de potencia; sin embargo, se pueden incluir reúsos adicionales en este enfoque sin cambios importantes en la

formulación matemática. Un objetivo clave que debe resolverse mediante el proceso de optimización es determinar la selección adecuada de tecnologías de tratamiento para las corrientes de aguas residuales que salen de los pozos (después de la fase de finalización). Por lo tanto, el modelo fijará el tamaño óptimo para las tecnologías de tratamiento y unidades de almacenamiento. Para este propósito, se ha implementado un enfoque de solución de compensación para analizar la dependencia entre minimizar el costo y consumo de agua. Se propone un modelo de optimización disyuntiva para seleccionar el conjunto de diferentes tecnologías de tratamiento de aguas residuales y almacenadores que se necesitan para satisfacer la extracción de gas considerando como variable un cronograma (programación) de fractura de pozos que se operan simultáneamente en un horizonte de planificación (ver **Figura 3.1**).



**Figura 3. 1. Metodología propuesta para evaluar la compensación entre TC y TWR.**

Se presenta el proceso general propuesto para el manejo del agua utilizada durante la fractura hidráulica, que incluye la inyección de agua fresca a los pozos fracturados (*fracking*), el agua de salida es enviada a unidades de tratamiento y almacenamiento, para su recirculación, según los requisitos en la fractura simultánea. El agua que sale de las unidades de tratamiento se envía directamente para su reúso. La formulación del modelo propuesto se basa en la superestructura presentada en la **Figura 3.2**, que incluye la segregación de aguas residuales en las tres vertientes. Cabe señalar que las aguas residuales se pueden almacenar para recircular en operaciones de fractura hidráulica y el agua restante se envía a un conjunto de tecnologías de tratamiento para obtener condiciones de calidad adecuadas en el fluido y ser reusadas en otras actividades.

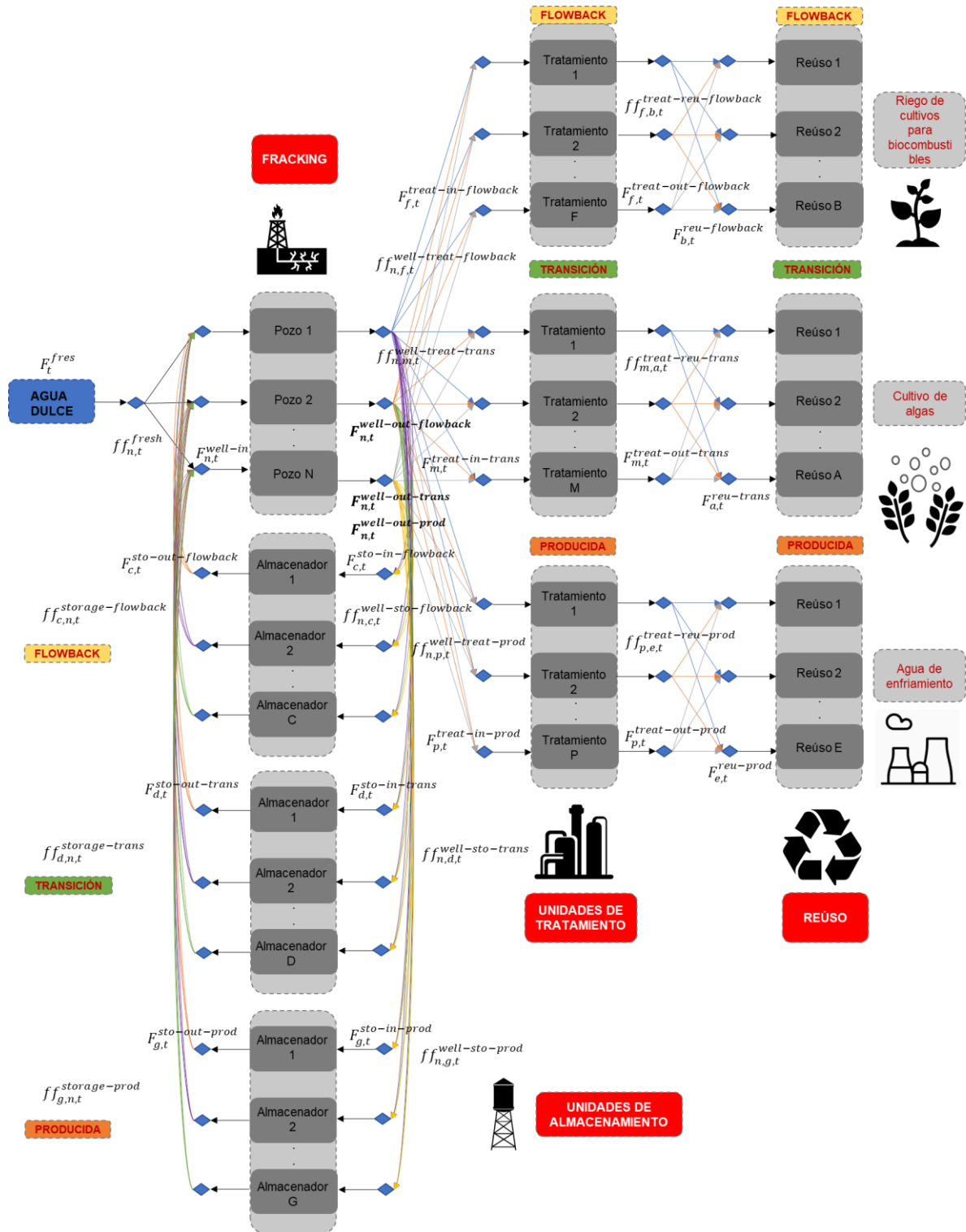


Figura 3. 2. Representación esquemática de la superestructura para la gestión del agua.

Por lo tanto, la formulación de optimización propuesta contiene las relaciones matemáticas necesarias para modelar los aspectos antes mencionados y las limitaciones para el agua disponible en la fuente fresca, así como los costos asociados con la gestión del agua involucrada en la industria del gas *shale*. Las relaciones requeridas se indican a continuación.

### 3.4.1. Restricciones para la disponibilidad de agua fresca

La disponibilidad de agua fresca es importante en varias partes del mundo y representa un gran desafío en la mayoría de las regiones con grandes reservas de gas *shale*.

$$F_t^{fresh} \leq \left( \frac{AvailV_t^{fresh-max}}{H^{time}} \right), \quad \forall t \quad (\text{Ec. 3.1})$$

Donde  $F_t^{fresh}$  representa el consumo de agua fresca durante el período de tiempo  $t$  ( $\text{m}^3/\text{día}$ ),  $AvailV_t^{fresh-max}$  es la disponibilidad de agua durante el período de tiempo  $t$  ( $\text{m}^3 / \text{semana}$ ), y  $H^{time}$  es un factor de conversión ( $\text{día/semana}$ ).

### 3.4.2. Segregación de agua fresca

El agua fresca es segregada y enviada a cada uno de los pozos  $n$  durante el proceso de fractura hidráulica:

$$F_t^{fresh} = \sum_n ff_{n,t}^{fresh}, \quad \forall t \quad (\text{Ec. 3.2})$$

### 3.4.3. Suministro de agua a pozos

Los requisitos de agua durante la fase de fractura hidráulica en cada pozo  $n$  ( $F_{n,t}^{well-in}$ ) provienen de la fuente de agua fresca ( $ff_{n,t}^{fresh}$ ) más el agua proveniente del sistema de almacenamiento de agua *flowback* ( $ff_{c,n,t}^{storage}$ ), transición ( $ff_{d,n,t}^{storage}$ ) y producida ( $ff_{g,n,t}^{storage}$ ):

$$F_{n,t}^{well-in} = ff_{n,t}^{fresh} + \sum_c ff_{c,n,t}^{storage-flowback} + \sum_d ff_{d,n,t}^{storage-trans} + \sum_g ff_{g,n,t}^{storage-prod}, \quad \forall n, \forall t \quad (\text{Ec. 3.3})$$

### 3.4.4. Corrientes de agua residual después de la fractura hidráulica

El agua residual proveniente después de la fractura hidráulica se clasifica de acuerdo con el tiempo  $t$  en que retorna. Para obtener la cantidad de agua de salida por tipo de agua  $F_{n,t}^{\text{well-out-flowback}}$ ,  $F_{n,t}^{\text{well-out-trans}}$ ,  $F_{n,t}^{\text{well-out-prod}}$ , se requiere de un factor  $\beta_{n,t}^{\text{flowback}}$ ,  $\beta_{n,t}^{\text{trans}}$ ,  $\beta_{n,t}^{\text{prod}}$  que indica la cantidad de agua que retorna a la superficie respecto al agua requerida en cada pozo  $F_{n,t}^{\text{well-in}}$ , a continuación, se muestran las ecuaciones para agua *flowback*, transición y producida, respectivamente.

$$F_{n,t}^{\text{well-out-flowback}} = \beta_{n,t}^{\text{flowback}} F_{n,t}^{\text{well-in}}, \quad \forall n, \forall t \quad (\text{Ec. 3.4})$$

$$F_{n,t}^{\text{well-out-trans}} = \beta_{n,t}^{\text{trans}} F_{n,t}^{\text{well-in}}, \quad \forall n, \forall t \quad (\text{Ec. 3.5})$$

$$F_{n,t}^{\text{well-out-prod}} = \beta_{n,t}^{\text{prod}} F_{n,t}^{\text{well-in}}, \quad \forall n, \forall t \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Luego, las cantidades de agua antes mencionadas regresan a la superficie ( $F_{n,t}^{\text{well-out-flowback}}$ ,  $F_{n,t}^{\text{well-out-trans}}$  y  $F_{n,t}^{\text{well-out-prod}}$ ) que representan parámetros conocidos para la formulación matemática propuesta.

### 3.4.5. Segregación de corrientes de agua residual

Posteriormente, cada tipo de agua a la salida del pozo es tratada o almacenada sin mezclarse para tener un tratamiento más efectivo. En este sentido, el balance para el agua a la salida de cada pozo se establece de la siguiente manera. En donde los subíndices  $f$ ,  $m$  y  $p$  representan las unidades de tratamiento para agua *flowback*, transición y producida, respectivamente. De igual manera para las unidades  $c$ ,  $d$  y  $g$  que representan las unidades de almacenamiento.

$$F_{n,t}^{\text{well-out-flowback}} = \sum_f \text{ff}_{n,f,t}^{\text{well-treat-flowback}} + \sum_c \text{ff}_{n,c,t}^{\text{well-sto-flowback}}, \quad \forall n, \forall t \quad (\text{Ec. 3.7})$$

$$F_{n,t}^{\text{well-out-trans}} = \sum_m \text{ff}_{n,m,t}^{\text{well-treat-trans}} + \sum_d \text{ff}_{n,d,t}^{\text{well-sto-trans}}, \quad \forall n, \forall t \quad (\text{Ec. 3.8})$$

$$F_{n,t}^{\text{well-out-prod}} = \sum_p \dot{f}_{n,p,t}^{\text{well-treat-prod}} + \sum_g \dot{f}_{n,g,t}^{\text{well-sto-prod}}, \quad \forall n, \forall t \quad (\text{Ec. 3.9})$$

### 3.4.6. Entrada de agua a las unidades de tratamiento

El enfoque propuesto considera una red de interceptación compuesta por varias unidades de tratamiento que normalmente se emplean para tratar el fluido proveniente de la fractura. En este contexto, se pueden considerar tecnologías para el tratamiento de aguas residuales incluso si implican diferentes costos y capacidades. El principal requisito para considerar cualquier tratamiento en este enfoque es que el flujo de salida tenga una buena calidad y las condiciones adecuadas para ser reusadas sin generar problemas ambientales o inconvenientes técnicos en el proceso. Finalmente, el modelo puede seleccionar las tecnologías requeridas (si considera diferentes unidades) y determinar el número de tecnologías de tratamiento y tamaño para cada una. Luego, el caudal de entrada a cualquier unidad de tratamiento  $f$ ,  $m$ ,  $p$  durante el período de tiempo  $t$  ( $F_{f,t}^{\text{treat-in-flowback}}$ ,  $F_{m,t}^{\text{treat-in-trans}}$ ,  $F_{p,t}^{\text{treat-in-prod}}$ ) es proporcionado por la suma de las aguas residuales provenientes de los pozos que requieren tratamiento ( $\dot{f}_{n,f,t}^{\text{well-treat-flowback}}$ ,  $\dot{f}_{n,m,t}^{\text{well-treat-trans}}$ ,  $\dot{f}_{n,p,t}^{\text{well-treat-prod}}$ ). Esto se establece en las ecuaciones 3.10, 3.11 y 3.12.

$$F_{f,t}^{\text{treat-in-flowback}} = \sum_n \dot{f}_{n,f,t}^{\text{well-treat-flowback}}, \quad \forall f, \forall t \quad (\text{Ec. 3.10})$$

$$F_{m,t}^{\text{treat-in-trans}} = \sum_n \dot{f}_{n,m,t}^{\text{well-treat-trans}}, \quad \forall m, \forall t \quad (\text{Ec. 3.11})$$

$$F_{p,t}^{\text{treat-in-prod}} = \sum_n \dot{f}_{n,p,t}^{\text{well-treat-prod}}, \quad \forall p, \forall t \quad (\text{Ec. 3.12})$$

### 3.4.7. Salida de agua de las unidades de tratamiento

Las unidades de tratamiento consideradas se colocan de acuerdo con el tipo de corrientes de aguas residual que se pueden tratar. El agua tratada *flowback*, transición y producida que sale de las tecnologías, se envía a un conjunto de reúsos disponibles.

$$F_{f,t}^{\text{treat-out-flowback}} = \sum_b \dot{f}_{f,b,t}^{\text{treat-reu-flowback}}, \quad \forall f, \forall t \quad (\text{Ec. 3.13})$$

$$F_{m,t}^{treat-out-trans} = \sum_a ff_{m,a,t}^{treat-reu-trans}, \quad \forall m, \forall t \quad (\text{Ec. 3.14})$$

$$F_{p,t}^{treat-out-prod} = \sum_e ff_{p,e,t}^{treat-reu-prod}, \quad \forall p, \forall t \quad (\text{Ec. 3.15})$$

### 3.4.8. Balance hídrico para el reúso de agua

En la entrada de los diferentes reúsos se mezclan las corrientes segregadas tratadas provenientes de diferentes tecnologías; por esta razón, las siguientes relaciones matemáticas se incluyen en la formulación del modelo.

$$F_{b,t}^{reu-flowback} = \sum_f ff_{f,b,t}^{treat-reu-flowback}, \quad \forall b, \forall t \quad (\text{Ec. 3.16})$$

$$F_{a,t}^{reu-trans} = \sum_m ff_{m,a,t}^{treat-reu-trans}, \quad \forall a, \forall t \quad (\text{Ec. 3.17})$$

$$F_{e,t}^{reu-prod} = \sum_p ff_{p,e,t}^{treat-reu-prod}, \quad \forall e, \forall t \quad (\text{Ec. 3.18})$$

Donde el tratamiento asegura que la calidad del agua cumple con la normativa medioambiental para los reúsos.

### 3.4.9. Entrada de agua a unidades de almacenamiento

La superestructura propuesta permite que las corrientes de aguas residuales que salen de los pozos puedan ser enviadas a las unidades de tratamiento y a los almacenadores (con el propósito de recircular el agua directamente). La entrada al sistema de almacenamiento es alimentada por los flujos de salida de los pozos en la fractura hidráulica y se escribe de la siguiente manera:

$$F_{c,t}^{sto-in-flowback} = \sum_n ff_{n,c,t}^{well-sto-flowback}, \quad \forall c, \forall t \quad (\text{Ec. 3.19})$$

$$F_{d,t}^{sto-in-trans} = \sum_n ff_{n,d,t}^{well-sto-trans}, \quad \forall d, \forall t \quad (\text{Ec. 3.20})$$

$$F_{g,t}^{sto-in-prod} = \sum_n \dot{f}_{n,g,t}^{well-sto-prod}, \quad \forall g, \forall t \quad (\text{Ec. 3.21})$$

Donde  $F_{c,t}^{sto-in-flowback}$ ,  $F_{d,t}^{sto-in-trans}$  y  $F_{g,t}^{sto-in-prod}$  representan el flujo total entrante a los almacenadores  $c$ ,  $d$  y  $g$  en un período de tiempo  $t$ .

#### 3.4.10. Salida de agua de las unidades de almacenamiento

Una vez que se almacenan las aguas residuales, se pueden recircular a la fractura hidráulica de cualquier pozo que se esté operando simultáneamente. Por lo tanto, la corriente de aguas residuales que sale de los almacenadores  $c$ ,  $d$  y  $g$  son recirculados ( $\dot{f}_{c,n,t}^{storage-flowback}$ ,

$\dot{f}_{d,n,t}^{storage-trans}$  y  $\dot{f}_{g,n,t}^{storage-prod}$ ) al pozo  $n$ .

$$F_{c,t}^{sto-out-flowback} = \sum_n \dot{f}_{c,n,t}^{storage-flowback}, \quad \forall c, \forall t \quad (\text{Ec. 3.22})$$

$$F_{d,t}^{sto-out-trans} = \sum_n \dot{f}_{d,n,t}^{storage-trans}, \quad \forall d, \forall t \quad (\text{Ec. 3.23})$$

$$F_{g,t}^{sto-out-prod} = \sum_n \dot{f}_{g,n,t}^{storage-prod}, \quad \forall g, \forall t \quad (\text{Ec. 3.24})$$

#### 3.4.11. Balance en unidades de tratamiento

La mayoría de las unidades de tratamiento tienen pérdidas de agua asociadas durante su operación, este aspecto se modela a través de las siguientes ecuaciones.

$$F_{f,t}^{treat-out-flowback} = \alpha_f^{treat-flowback} F_{f,t}^{treat-in-flowback}, \quad \forall f, \forall t \quad (\text{Ec. 3.25})$$

$$F_{m,t}^{treat-out-trans} = \alpha_m^{treat-trans} F_{m,t}^{treat-in-trans}, \quad \forall m, \forall t \quad (\text{Ec. 3.26})$$

$$F_{p,t}^{treat-out-prod} = \alpha_p^{treat-prod} F_{p,t}^{treat-in-prod}, \quad \forall p, \forall t \quad (\text{Ec. 3.27})$$

Donde  $\alpha_f^{treat-flowback}$ ,  $\alpha_m^{treat-trans}$  y  $\alpha_p^{treat-prod}$  representan el factor de eficiencia en términos del caudal volumétrico de la unidad  $f$ ,  $m$  y  $p$ .

### 3.4.12. Balance en unidades de almacenamiento

Un desafío importante para los campos de gas *shale* existentes e incluso para zonas con importantes reservas de gas, pero sin explotar este recurso, está asociado con la disponibilidad de agua. La importancia de las unidades de almacenamiento es ahorrar aguas para ser utilizadas durante la explotación de campos simultaneos. El siguiente balance establece que el volumen de los almacenadores  $c, d, g$  en el tiempo  $t$  ( $V_{c,t}^{sto-flowback}, V_{d,t}^{sto-trans}, V_{g,t}^{sto-prod}$ ) es igual al volumen en el período de tiempo anterior ( $V_{c,t-1}^{sto-flowback}, V_{d,t-1}^{sto-trans}, V_{g,t-1}^{sto-prod}$ ), más la diferencia entre los caudales de entrada y salida multiplicada por el factor de conversión de tiempo  $H^{time}$ . Esto se muestra en las ecuaciones 28-33.

$$V_{c,t}^{sto-flowback} = V_c^{sto-initial-flowback} + H^{time} (F_{c,t}^{sto-in-flowback} - F_{c,t}^{sto-out-flowback}), \quad \forall c, \forall t = 1 \quad (\text{Ec. 3.28})$$

$$V_{c,t}^{sto-flowback} = V_{c,t-1}^{sto-flowback} + H^{time} (F_{c,t}^{sto-in-flowback} - F_{c,t}^{sto-out-flowback}), \quad \forall c, \forall t > 1 \quad (\text{Ec. 3.29})$$

$$V_{d,t}^{sto-trans} = V_d^{sto-initial-trans} + H^{time} (F_{d,t}^{sto-in-trans} - F_{d,t}^{sto-out-trans}), \quad \forall d, \forall t = 1 \quad (\text{Ec. 3.30})$$

$$V_{d,t}^{sto-trans} = V_{d,t-1}^{sto-trans} + H^{time} (F_{d,t}^{sto-in-trans} - F_{d,t}^{sto-out-trans}), \quad \forall d, \forall t > 1 \quad (\text{Ec. 3.31})$$

$$V_{g,t}^{sto-prod} = V_g^{sto-initial-prod} + H^{time} (F_{g,t}^{sto-in-prod} - F_{g,t}^{sto-out-prod}), \quad \forall g, \forall t = 1 \quad (\text{Ec. 3.32})$$

$$V_{g,t}^{sto-prod} = V_{g,t-1}^{sto-prod} + H^{time} (F_{g,t}^{sto-in-prod} - F_{g,t}^{sto-out-prod}), \quad \forall g, \forall t > 1 \quad (\text{Ec. 3.33})$$

Cabe señalar que, para la primera vez, se considera un volumen de almacenamiento inicial conocido. Además, es necesario garantizar la continuidad de los ciclos; esta es la razón para igualar el volumen inicial con el último volumen en el almacenador  $c, d, g$ :

$$V_d^{sto-initial-trans} = V_{d,t}^{sto-trans}, \quad \forall t = t^{final} \quad (\text{Ec. 3.34})$$

$$V_c^{sto-initial-flowback} = V_{c,t}^{sto-flowback}, \quad \forall t = t^{final} \quad (\text{Ec. 3.35})$$

$$V_g^{sto-initial-prod} = V_{g,t}^{sto-prod}, \quad \forall t = t^{final} \quad (\text{Ec. 3.36})$$

Nótese que en la práctica se utilizan unidades de almacenamiento con un valor inicial de cero, en este sentido, para el modelo matemático se considera que el valor inicial no tiene efecto en la optimización, sin embargo, si se pretende modelar en estado estacionario no habría problema para el uso del modelo matemático propuesto, al considerar cualquier otro valor.

### 3.4.13. Capacidad y existencia de unidades de tratamiento

Algunos de los objetivos clave que aborda el modelo de optimización son determinar el número de unidades de almacenamiento, tecnologías de tratamiento y sus correspondientes capacidades. Al respecto, las siguientes relaciones seleccionan si las unidades  $f$ ,  $m$ ,  $p$  son requeridas o no (la existencia de las unidades de tratamiento se modela a través de las variables binarias  $y_f^{treat-flowback}$ ,  $y_m^{treat-trans}$ ,  $y_p^{treat-prod}$ ). Además, la capacidad operativa para cada tratamiento está representada por:

$$F_f^{treat-cap-flowback} \geq F_{f,t}^{treat-in-flowback}, \quad \forall f, \forall t \quad (\text{Ec. 3.37})$$

$$F_f^{treat-cap-flowback} \leq F_f^{treat-max-flowback} y_f^{treat-flowback}, \quad \forall f \quad (\text{Ec. 3.38})$$

$$F_m^{treat-cap-trans} \geq F_{m,t}^{treat-in-trans}, \quad \forall m, \forall t \quad (\text{Ec. 3.39})$$

$$F_m^{treat-cap-trans} \leq F_m^{treat-max-trans} y_m^{treat-trans}, \quad \forall m \quad (\text{Ec. 3.40})$$

$$F_p^{treat-cap-prod} \geq F_{p,t}^{treat-in-prod}, \quad \forall p, \forall t \quad (\text{Ec. 3.41})$$

$$F_p^{treat-cap-prod} \leq F_p^{treat-max-prod} y_p^{treat-prod}, \quad \forall p \quad (\text{Ec. 3.42})$$

Donde el subíndice  $\max$  representa un límite superior para la capacidad operativa asociada con la unidad de tratamiento (esta información puede ser proporcionada por el vendedor de tecnologías de tratamiento). Deben tenerse en cuenta que las capacidades óptimas  $F_f^{treat-cap-flowback}$ ,  $F_m^{treat-cap-trans}$ ,  $F_p^{treat-cap-prod}$  deben ser empleadas por la función de costos relacionada con los costos de tratamiento.

### 3.4.14. Capacidad y existencia de unidades de almacenamiento

Del mismo modo, para las unidades de almacenamiento se requieren las siguientes relaciones:

$$V_c^{sto-cap-flowback} \geq V_{c,t}^{sto-flowback}, \quad \forall c, \forall t \quad (\text{Ec. 3.43})$$

$$V_c^{sto-cap-flowback} \leq V_c^{sto-max-flowback} y_c^{sto-flowback}, \quad \forall c \quad (\text{Ec. 3.44})$$

$$V_d^{sto-cap-trans} \geq V_{d,t}^{sto-trans}, \quad \forall d, \forall t \quad (\text{Ec. 3.45})$$

$$V_d^{sto-cap-trans} \leq V_d^{sto-max-trans} y_d^{sto-trans}, \quad \forall d \quad (\text{Ec. 3.46})$$

$$V_g^{sto-cap-prod} \geq V_{g,t}^{sto-prod}, \quad \forall g, \forall t \quad (\text{Ec. 3.47})$$

$$V_g^{sto-cap-prod} \leq V_g^{sto-max-prod} y_g^{sto-prod}, \quad \forall g \quad (\text{Ec. 3.48})$$

Donde  $V_c^{sto-cap-flowback}$ ,  $V_d^{sto-cap-trans}$ ,  $V_g^{sto-cap-prod}$  denotar la capacidad óptima para unidades de almacenamiento; mientras  $y_c^{sto-flowback}$ ,  $y_d^{sto-trans}$ ,  $y_g^{sto-prod}$  son variables binarias para modelar la existencia de unidades.

### 3.4.15. Requerimiento de agua fresca

Aunque se pueden superar las limitaciones del consumo de agua, es importante cuantificar el agua total necesaria para completar todos los pozos propuestos. Por lo tanto, la siguiente relación determina las necesidades totales de agua. (*TWR*):

$$TWR = H^{\text{time}} \sum_t F_t^{\text{fresh}} \quad (\text{Ec. 3.49})$$

Cabe señalar que la ecuación anterior representa el objetivo ambiental considerado por este proyecto.

### 3.4.16. Costos de operación

Los costos operativos involucrados en este proyecto corresponden al costo del agua fresca, los costos operativos de las unidades de tratamiento y los costos de transporte (incluyendo todas las trayectorias), los cuales se describen en detalle a continuación.

#### *Costo de agua fresca*

El costo de agua fresca ( $\text{Cost}^{fresh}$ ) se obtiene multiplicando la suma del agua requerida durante todos los períodos por el costo unitario de agua fresca ( $UC^{fresh}$ ) considerando el factor de conversión de tiempo:

$$\text{Cost}^{fresh} = H^{\text{time}} UC^{fresh} \sum_t F_t^{fresh} \quad (\text{Ec. 3.50})$$

#### *Costos operativos de unidades de tratamiento*

Los costos operativos de las unidades de tratamiento son determinados como sigue:

$$\text{Cost}^{op-treat-flowback} = H^{\text{time}} \sum_f \sum_t UOC_f^{\text{treat-flowback}} F_{f,t}^{\text{treat-in-flowback}} \quad (\text{Ec. 3.51})$$

$$\text{Cost}^{op-treat-trans} = H^{\text{time}} \sum_m \sum_t UOC_m^{\text{treat-trans}} F_{m,t}^{\text{treat-in-trans}} \quad (\text{Ec. 3.52})$$

$$\text{Cost}^{op-treat-prod} = H^{\text{time}} \sum_p \sum_t UOC_p^{\text{treat-prod}} F_{p,t}^{\text{treat-in-prod}} \quad (\text{Ec. 3.53})$$

$UOC^{\text{treat}}$  es el costo operativo unitario de la unidad de tratamiento asociado con las tecnologías de tratamiento del agua *flowback*, transición y producida.

#### *Costo de transporte de agua fresca*

El costo del transporte de agua fresca ( $\text{Cost}^{\text{trans-fresh}}$ ) se puede calcular multiplicando la suma de los caudales de agua fresca enviados al pozo  $n$  en el período de tiempo  $t$  multiplicado por el costo unitario de transporte ( $UTC_n^{fresh}$ ):

$$\text{Cost}^{\text{trans-fresh}} = H^{\text{time}} \sum_n \sum_t UTC_n^{fresh} ff_{n,t}^{fresh} \quad (\text{Ec. 3.54})$$

Cabe señalar que los costos unitarios son diferentes para cada pozo al considerar la distancia geográfica entre la fuente de agua fresca y cada pozo. Es importante mencionar que el recurso de agua fresca está disponible a distancias significativas de los pozos.

#### *Costo de transporte del agua de los pozos en la fractura hidráulica al tratamiento*

El agua de salida de los pozos se transporta a la red de interceptación y el costo asociado a esta operación se considera a través de las siguientes relaciones:

$$\text{Cost}^{trans-flowback} = H^{\text{time}} \sum_n \sum_f \sum_t \text{UTC}_{n,f}^{\text{used-flowback}} \text{ff}_{n,f,t}^{\text{well-treat-flowback}} \quad (\text{Ec. 3.55})$$

$$\text{Cost}^{trans-trans} = H^{\text{time}} \sum_n \sum_m \sum_t \text{UTC}_{n,m}^{\text{used-trans}} \text{ff}_{n,m,t}^{\text{well-treat-trans}} \quad (\text{Ec. 3.56})$$

$$\text{Cost}^{trans-prod} = H^{\text{time}} \sum_n \sum_p \sum_t \text{UTC}_{n,p}^{\text{used-prod}} \text{ff}_{n,p,t}^{\text{well-treat-prod}} \quad (\text{Ec. 3.57})$$

$\text{UTC}_{n,f}^{\text{used-flowback}}$ ,  $\text{UTC}_{n,m}^{\text{used-trans}}$ ,  $\text{UTC}_{n,p}^{\text{used-prod}}$  son los costos unitarios de transporte de las aguas residuales en el trayecto generado por el pozo  $n$  y tratamientos  $f$ ,  $m$ ,  $p$ . El costo unitario es diferente para cada ruta.

#### *Costo de transporte de agua tratada a reúso*

El caudal proveniente del tratamiento se envía a los distintos reúsos y los costos de transporte que se generan se expresan de la siguiente manera:

$$\text{Cost}^{trans-treat-reu-flowback} = H^{\text{time}} \sum_f \sum_b \sum_t \text{UTC}_{f,b}^{\text{treat-reu-flowback}} \text{ff}_{f,b,t}^{\text{treat-reu-flowback}} \quad (\text{Ec. 3.58})$$

$$\text{Cost}^{trans-treat-reu-trans} = H^{\text{time}} \sum_m \sum_a \sum_t \text{UTC}_{m,a}^{\text{treat-reu-trans}} \text{ff}_{m,a,t}^{\text{treat-reu-trans}} \quad (\text{Ec. 3.59})$$

$$\text{Cost}^{trans-treat-reu-prod} = H^{\text{time}} \sum_p \sum_e \sum_t \text{UTC}_{p,e}^{\text{treat-reu-prod}} \text{ff}_{p,e,t}^{\text{treat-reu-prod}} \quad (\text{Ec. 3.60})$$

$UTC_{f,b}^{treat-reu-flowback}$ ,  $UTC_{m,a}^{treat-reu-trans}$ ,  $UTC_{p,e}^{treat-reu-prod}$  son los costos unitarios de transporte del agua desde el tratamiento  $f$  hasta el reúso  $b$ , el tratamiento  $m$  para el reúso  $a$  y el tratamiento  $p$  para el reúso  $e$ , respectivamente.

*Costo de transporte de agua de salida de pozo en fractura hidráulica al almacenamiento*

Las ecuaciones 61-63 representan los costos de transporte de los diferentes tipos de agua *flowback*, transición y agua producida provenientes de los pozos a los almacenadores.

$$Cost^{trans-well-sto-flowback} = H^{time} \sum_n \sum_c \sum_t UTC_{n,c}^{well-sto-flowback} ff_{n,c,t}^{well-sto-flowback} \quad (\text{Ec. 3.61})$$

$$Cost^{trans-well-sto-trans} = H^{time} \sum_n \sum_d \sum_t UTC_{n,d}^{well-sto-trans} ff_{n,d,t}^{well-sto-trans} \quad (\text{Ec. 3.62})$$

$$Cost^{trans-well-sto-prod} = H^{time} \sum_n \sum_g \sum_t UTC_{n,g}^{well-sto-prod} ff_{n,g,t}^{well-sto-prod} \quad (\text{Ec. 3.63})$$

$UTC_{n,c}^{well-sto-flowback}$ ,  $UTC_{n,d}^{well-sto-trans}$ ,  $UTC_{n,g}^{well-sto-prod}$  representan el costo unitario de transporte del agua desde el pozo  $n$  hasta el almacenador  $c$ ,  $d$ ,  $g$ .

*Costo de transporte de almacenador a pozo*

Se emplean las siguientes relaciones matemáticas para determinar los costos de transporte desde los almacenadores hasta los pozos:

$$Cost^{trans-sto-well-flowback} = H^{time} \sum_c \sum_n \sum_t UTC_{c,n}^{sto-well-flowback} ff_{c,n,t}^{storage-flowback} \quad (\text{Ec. 3.64})$$

$$Cost^{trans-sto-well-trans} = H^{time} \sum_d \sum_n \sum_t UTC_{d,n}^{sto-well-trans} ff_{d,n,t}^{storage-trans} \quad (\text{Ec. 3.65})$$

$$Cost^{trans-sto-well-prod} = H^{time} \sum_g \sum_n \sum_t UTC_{g,n}^{sto-well-prod} ff_{g,n,t}^{storage-prod} \quad (\text{Ec. 3.66})$$

$UTC_{c,n}^{sto-well-flowback}$ ,  $UTC_{d,n}^{sto-well-trans}$ ,  $UTC_{g,n}^{sto-well-prod}$  denotan los costos unitarios de transporte de las aguas residuales que van desde los almacenadores  $c$ ,  $d$ ,  $g$  hasta el pozo  $n$ , los cuales son diferente según cada trayectoria tomando en cuenta la ubicación geográfica.

### 3.4.17. Costo operativo total

Finalmente, la suma de todos los costos operativos descritos anteriormente produce el  $TOC$  para el proyecto:

$$\begin{aligned}
 TOC = & \text{Cost}^{fresh} + \text{Cost}^{op-treat-flowback} + \text{Cost}^{op-treat-trans} + \text{Cost}^{op-treat-prod} + \\
 & \text{Cost}^{trans-fresh} + \text{Cost}^{trans-flowback} + \text{Cost}^{trans-trans} + \text{Cost}^{trans-prod} + \text{Cost}^{trans-treat-reu-flowback} + \quad (\text{Ec. 3.67}) \\
 & \text{Cost}^{trans-treat-reu-trans} + \text{Cost}^{trans-treat-reu-prod} + \text{Cost}^{trans-well-sto-flowback} + \text{Cost}^{trans-well-sto-trans} + \\
 & \text{Cost}^{trans-well-sto-prod} + \text{Cost}^{trans-sto-well-flowback} + \text{Cost}^{trans-sto-well-trans} + \text{Cost}^{trans-sto-well-prod}
 \end{aligned}$$

Los superíndices denotan los siguientes costos: agua fresca  $fresh$ , operativos de tratamiento ( $op-treat-flowback, trans, prod$ ), transporte de agua fresca ( $trans-fresh$ ) transporte de pozo a tratamiento ( $trans-flowback, trans, prod$ ), transporte de tratamiento a reúso  $trans-treat-reu-flowback, trans, prod$ , transporte de pozo a almacenador ( $trans-well-sto-flowback, trans, prod$ ) y por ultimo transporte de almacenador a pozo ( $trans-sto-well-flowback, trans, prod$ ). Cabe mencionar que en los casos anteriores se considera un costo por cada clasificación del agua.

### 3.4.18. Costos de capital

La adquisición de unidades de tratamiento y unidades de almacenamiento genera costos de capital, los cuales se incluyen en la función de objetivo económico.

*Costos de capital para unidades de tratamiento*

Los costos de capital para las tecnologías de tratamiento relacionadas con el  $flowback$ , transición y el agua producida, involucran dos términos; el primero corresponde a un cargo fijo ( $FC^{treat-flowback}, FC^{treat-trans}, FC^{treat-prod}$ ) que para ser activado depende solo de la existencia de la unidad (esto se multiplica por la variable binaria ( $y_f^{treat-flowback}, y_m^{treat-trans}, y_p^{treat-prod}$ )) y el segundo

multiplica la capacidad de la unidad por el costo unitario  $VC^{treat-flowback}$ ,  $VC^{treat-trans}$ ,  $VC^{treat-prod}$ , como sigue:

$$Cap\ Cost^{treat-flowback} = k_{Ffb} \sum_f \left[ FC^{treat-flowback} y_f^{treat-flowback} + VC^{treat-flowback} (F_f^{treat-cap-flowback}) \right] \quad (\text{Ec. 3.68})$$

$$Cap\ Cost^{treat-trans} = k_{Ftrans} \sum_m \left[ FC^{treat-trans} y_m^{treat-trans} + VC^{treat-trans} (F_m^{treat-cap-trans}) \right] \quad (\text{Ec. 3.69})$$

$$Cap\ Cost^{treat-prod} = k_{Fprod} \sum_p \left[ FC^{treat-prod} y_p^{treat-prod} + VC^{treat-prod} (F_p^{treat-cap-prod}) \right] \quad (\text{Ec. 3.70})$$

Donde  $k_{Ffb}$ ,  $k_{Ftrans}$ ,  $k_{Fprod}$  son los factores para anualizar la inversión. Cabe señalar que en la relación anterior los cargos fijos y variables  $FC$  y  $VC$  se determinan antes del proceso de optimización.

#### *Costos de capital para unidades de almacenamiento*

Del mismo modo, para las unidades de almacenamiento:

$$Cap\ Cost^{storage-flowback} = k_{Ffb} \sum_c \left[ FC^{storage-flowback} y_c^{storage-flowback} + VC^{storage-flowback} (V_c^{sto-cap-flowback}) \right] \quad (\text{Ec. 3.71})$$

$$Cap\ Cost^{storage-trans} = k_{Ftrans} \sum_d \left[ FC^{storage-trans} y_d^{storage-trans} + VC^{storage-trans} (V_d^{sto-cap-trans}) \right] \quad (\text{Ec. 3.72})$$

$$Cap\ Cost^{storage-prod} = k_{Fprod} \sum_g \left[ FC^{storage-prod} y_g^{storage-prod} + VC^{storage-prod} (V_g^{sto-cap-prod}) \right] \quad (\text{Ec. 3.73})$$

#### **3.4.19. Costo de capital total**

El costo de capital total ( $TCC$ ) considera los costos para la adquisición de las unidades tratamiento y almacenamiento para los tres tipos de agua:

$$TCC = Cap\ Cost^{treat-flowback} + Cap\ Cost^{treat-trans} + Cap\ Cost^{treat-prod} + Cap\ Cost^{storage-flowback} + Cap\ Cost^{storage-trans} + Cap\ Cost^{storage-prod} \quad (\text{Ec. 3.74})$$

### 3.4.20. Venta total de agua de reúso

El reúso de agua residual tratada representa beneficios económicos (debido a que estas corrientes se venden) y ambientales (evitando la disposición final de las corrientes). La siguiente ecuación incluye el ingreso económico de la venta de corrientes de aguas residuales tratadas:

$$TVC = H^{\text{time}} \left[ \begin{array}{l} \sum_b \sum_t UVC_b^{\text{reu-flowback}} F_{b,t}^{\text{reu-flowback}} + \\ \sum_a \sum_t UVC_a^{\text{reu-trans}} F_{a,t}^{\text{reu-trans}} + \\ \sum_e \sum_t UVC_e^{\text{reu-prod}} F_{e,t}^{\text{reu-prod}} \end{array} \right] \quad (\text{Ec. 3.75})$$

Los costos unitarios de venta para los distintos reúsos vienen dados por  $UVC_b^{\text{reu-flowback}}$ ,  $UVC_a^{\text{reu-trans}}$ ,  $UVC_e^{\text{reu-prod}}$ .

### 3.4.21. Costo total

El costo total ( $TC$ ) viene dado por la suma del costo operativo total, el costo de capital total y la diferencia en la venta total de agua de reúso.

$$TC = TOC + TCC - TVC \quad (\text{Ec. 3.76})$$

### 3.4.22. Función objetivo

La formulación generada corresponde a un problema multi-objetivo y se desea minimizar ambas variables.

$$O.F. = \min \{TC, TWR\} \quad (\text{Ec. 3.77})$$

En donde la función objetivo está sujeta a todas las restricciones anteriores. Por lo tanto, el enfoque propuesto corresponde a un problema de programación lineal de enteros mixtos (MILP) multi-objetivo, y se aplica un enfoque de solución de compensación para resolverlo y determinar las compensaciones entre las soluciones ( $TC$  mínima y  $TWR$  mínima).

## CAPÍTULO IV

### 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Introducción

En el presente capítulo se muestra el caso de estudio a abordar de acuerdo al modelo matemático antes descrito en el capítulo III sección 3.4. Así como la metodología codificada en el software GAMS®. Se especifica una optimización multi-objetivo que contempla aspectos económicos y ambientales, en las secciones siguientes se explica a detalle la variable a tratar. Finalmente se muestran los resultados obtenidos al aplicar el modelo matemático a distintos casos de estudio.

#### 4.2. Implementación de la metodología

Para mostrar la implementación de la metodología propuesta, se presenta un caso de estudio. En este contexto, la formulación de optimización se codificó en el software GAMS® y se resolvió en un procesador AMD Radeon™ de 2.3 0GHz y 8 GB de RAM en 0.25 s de tiempo de CPU utilizando el solucionador CPLEX en el Sistema de Modelado Algebraico General. El problema incluye 26,236 variables continuas, 9 variables discretas y 10,930 restricciones. Los resultados se presentan de la siguiente manera.

#### 4.3. Descripción del caso de estudio

Es importante mencionar que este ejemplo es un caso de estudio hipotético; sin embargo, se utilizan datos reales para obtener resultados aproximados a la realidad. Para implementar el enfoque propuesto, se han tomado los parámetros necesarios de informes técnicos con datos actualizados para las regiones de Marcellus y Barnett, como: 15,000 m<sup>3</sup> en requerimientos de agua para la fractura y precio de venta de agua fresca \$ 0.25-0.35 / bbl (\$ 1.56-2.18 / m<sup>3</sup>) [12], [23].

En este sentido, EUA ha crecido significativamente en la producción de gas *shale* en los últimos años, hoy es el productor número uno de gas natural en el mundo. En este sentido, Marcellus (ubicado principalmente en Pensilvania) y Barnett (ubicada en Texas) tienen las mayores reservas de gas *shale*.

En este ejemplo se considera completar 20 pozos con tres tripulaciones de fracturamiento (capaces de realizar la fractura hidráulica simultáneamente) según un cronograma dado, la perforación demora aproximadamente 5 semanas por pozo, la gestión del agua se optimiza en períodos de tiempo de una semana con un horizonte de tiempo de 90 semanas para completar el proceso y 32 semanas para completar la salida de aguas residuales luego de la fractura. Una vez finalizada la perforación, las aguas residuales comienzan a retornar, clasificándose en: *flowback*, transición y producida (según el período de tiempo en el que el agua comienza a retornar). El agua *flowback* regresa las primeras 3 semanas después de que finaliza la perforación, el agua de transición las siguientes 12 semanas (después de terminar el agua *flowback*) y el agua producida regresa las siguientes 17 semanas (después de terminar de devolver el agua de transición). Así, es posible establecer los siguientes períodos de tiempo para capturar y recolectar cada tipo de corrientes de aguas residuales; si la semana en la que se completa la fractura corresponde al tiempo cero, entonces, el *flowback* está regresando en los períodos de tiempo 1-3, el agua de transición se recolecta en las semanas 4-15 y el agua producida regresa durante las semanas 16-32. Además, los porcentajes de las corrientes de aguas residuales que regresan a la superficie con respecto al total de agua inyectada son los siguientes: para el *flowback* es 20.59%, transición corresponde al 12.13% y producida es 6.58% [22]. En este sentido, todos flujos internos de salida de los pozos se han determinado, así como sus fluctuaciones con respecto al tiempo.

Además, los requisitos de agua fresca necesarios en el proceso de fractura hidráulica se encuentran entre 7.6 y 15 millones de litros ( $7,600 \text{ m}^3$  y  $15,000 \text{ m}^3$ ) por pozo debido a que los pozos generalmente se perforan en múltiples etapas de fracturamiento [18] e incluso este intervalo puede ser más amplio, como para la región de Marcellus *shale*, que se ha estimado entre  $8,000$ - $27,000 \text{ m}^3$  [12]. Por ello, en este trabajo se utiliza un valor promedio de  $15,000 \text{ m}^3$  para las necesidades de agua para completar cada pozo. Recordando que la fractura requiere 5 semanas, entonces el caudal de agua requerido es de  $428.57 \text{ m}^3 / \text{día}$ . Asimismo, en este procedimiento se pueden estimar los caudales de aguas residuales, que corresponden a  $273.51 \text{ m}^3 / \text{día}$ ,  $140 \text{ m}^3 / \text{día}$  y  $27.7 \text{ m}^3 / \text{día}$  para el agua *flowback* en las semanas 1, 2 y 3, respectivamente. El agua de transición tiene un valor de  $26.4 \text{ m}^3 / \text{día}$  para las semanas 4-6,  $23.5 \text{ m}^3 / \text{día}$  para las semanas 7-9,  $20.9 \text{ m}^3 / \text{día}$  para las semanas 10-12 y  $15.8 \text{ m}^3 / \text{día}$  para las semanas 13-15. Finalmente, el agua producida tiene un valor de  $13.2 \text{ m}^3 / \text{día}$  para las semanas 16-20,  $9.1 \text{ m}^3 / \text{día}$  para las semanas 21-25,  $4.9 \text{ m}^3 / \text{día}$  para las semanas 26-30 y finalmente  $2.5 \text{ m}^3 / \text{día}$  para las semanas

31-32. Se utiliza un factor de conversión de tiempo  $H^{time}$  (7 días / semana) para la consistencia de las unidades, mientras que los factores para anualizar la inversión de las unidades de tratamiento y almacenamiento de agua *flowback*, transición y producida ( $k_{Ffb}$ ,  $k_{Ftrans}$  y  $k_{Fprod}$ ) tienen un valor de 0.1 [10]. En este trabajo se consideran dos tipos de tecnologías de tratamiento: destilación por membranas y ósmosis directa, que pueden garantizar una calidad de agua de salida en condiciones de reúso (cumpliendo con las limitaciones ambientales); sin embargo, la eficiencia volumétrica depende del tipo de flujo de aguas residuales (debido al tratamiento de las corrientes contaminadas se provoca una menor eficiencia respecto a las corrientes más limpias). Para las unidades de almacenamiento, no hay volumen inicial ( $V_c^{sto-initial-flowback} = V_d^{sto-initial-trans} = V_g^{sto-initial-prod} = 0$ ), el volumen máximo para estas unidades es diferente para cada clasificación (*flowback*, transición y agua producida). La **Tabla 4.1** muestra los costos fijos y variables (para la adquisición de nuevas unidades de almacenamiento y tratamiento) para la clasificación de los tres tipos de agua residual [10]. Además, se muestran los precios de venta del agua después de pasar por las unidades de tratamiento. Es importante mencionar que los parámetros utilizados en la clasificación del agua de transición y producida son valores teóricos, de acuerdo con la tendencia esperada en el volumen de aguas residuales.

**Tabla 4. 1. Parámetros utilizados en unidades para la gestión de agua (escenario A-D).**

CONCEPTO	Flowback	Transición	Producida
Flujo máximo en unidades de tratamiento ( $F^{treat-max}$ ), m <sup>3</sup> / día	500	400	300
Volumen máximo en unidades de almacenamiento ( $V^{sto-max}$ ), m <sup>3</sup>	12,000	10,000	8,000
Costo fijo por unidad de tratamiento ( $FC^{treat}$ ), \$	95,000	96,000	98,000
Costo variable por flujo en unidad de tratamiento ( $VC^{treat}$ ), \$ / m <sup>3</sup>	4.1	4.2	4.3
Costo fijo por unidad de almacenamiento ( $FC^{storage}$ ), \$	10,000	9,000	8,000
Costo variable por flujo en unidad de almacenamiento ( $VC^{storage}$ ), \$ / m <sup>3</sup>	6.3	6.2	6.1
Costo unitario de venta de agua de reúso ( $UVC^{reu}$ ), \$ / m <sup>3</sup>	1.0	0.8	0.6

Además, en la **Tabla 4.2** se muestran algunos parámetros implementados, entre ellos factores de eficiencia y costos de operación para las diferentes unidades de tratamiento, cabe mencionar que, en este caso de estudio, la unidad 1 se refiere al tratamiento por medio de destilación por membrana y la unidad 2 por ósmosis directa. También muestra los costos unitarios de transporte de agua, implementados en cada trayectoria (pozos-tratamiento, tratamiento-reúso, pozo-almacenamiento y almacenamiento-pozo), se consideran diferentes fluctuaciones de acuerdo a cada cuadrilla de operación [12],[23]. Lo anterior se incluye en los parámetros utilizados en los casos de estudio.

. En este caso, es importante mencionar que los 20 pozos están clasificados por tres zonas de acuerdo a su posición; así, los pozos 1-8 son el área 1, los pozos 9-15 corresponden al área 2 y los pozos 16-20 representan el área 3. Cabe señalar que cada cuadrilla puede completar los pozos asociados al área geográfica; en consecuencia, la tripulación 1 opera el área 1, la tripulación 2 completa el área 2 y finalmente la tripulación 3 corresponde al área 3. Por lo tanto, el costo del transporte depende de las áreas geográficas.

**Tabla 4. 2. Costos y eficiencias (escenario A-D).**

CONCEPTO	Flowback	Transción	Producida
Factor de eficiencia en unidades de tratamiento ( $\alpha^{\text{treat}}$ )			
1	0.94	0.80	0.60
2	0.88	0.72	0.52
Costo operativo unitario de las unidades de tratamiento, ( $UOC^{\text{treat}}$ ), \$ / m <sup>3</sup>			
1	12.0	17.5	26.7
2	10.3	14.0	23.0
Costo unitario de transporte de tratamiento a reúso ( $UTC^{\text{treat-reu}}$ ), \$ / m <sup>3</sup>	1.41	1.41	1.41
CONCEPTO	Tripulación 1	Tripulación 2	Tripulación 3
Costo unitario de transporte de agua fresca ( $UTC_n^{\text{fresh}}$ ), \$ / m <sup>3</sup>	4	7	12
Costo unitario de transporte de pozo a tratamiento ( $UTC_n^{\text{used}}$ ), \$ / m <sup>3</sup>	0.39	0.72	0.94
Costo unitario de transporte de pozo a almacenador ( $UTC_n^{\text{well-sto}}$ ), \$ / m <sup>3</sup>	0.98	1.23	1.65
Costo unitario de transporte de almacenador a pozo ( $UTC_n^{\text{sto-well}}$ ), \$ / m <sup>3</sup>	0.98	1.23	1.65

Los reusos considerados son: riego de cultivos para biocombustibles, cultivo de algas y agua de enfriamiento en plantas de potencia; donde los requisitos son diferentes para cada uno. En particular, en este caso de estudio, se propone reusar el agua *flowback* tratada en riego de cultivos para biocombustibles (porque requiere un agua de alta calidad, casi libre de contaminantes); el agua de transición tratada puede ser reusada en el cultivo de algas (ya que los requisitos de calidad son menores) y finalmente, el agua producida tratada puede ser enviada a centrales eléctricas debido a que las condiciones contaminantes son más laxas que las anteriores y en centrales eléctricas, el agua no está en contacto directo con la materia viva como en el caso del riego o el cultivo. En consecuencia, los precios de venta unitarios para cada tipo de agua son inferiores al precio de venta del agua fresca (2 \$ / m<sup>3</sup>), debido a la calidad del agua.

Además, con el propósito de visualizar la importancia de la programación para realizar la fractura hidráulica; Se han considerado diferentes escenarios (donde el único aspecto que cambia entre ellos es la programación) de la siguiente manera:

#### 4.3.1. Escenario A

En este caso, la programación fija se da en la **Tabla 4.3**. Como puede verse, la tripulación 1 de *fracking* tiene como objetivo completar 8 pozos, mientras que la tripulación 2 puede realizar el *fracking* a 7 pozos y finalmente la tripulación 3 se ocupará de 6 pozos. Además, dos equipos de fracturamiento hidráulico trabajan al inicio y en la semana 5 se incorpora la tripulación 3 para operar. Sin embargo, aproximadamente a mediados de año (semanas 24-26) no se permite operar a ninguna tripulación debido a la escasez de agua; gradualmente, cuando la disponibilidad de agua permite operar, los equipos de fracturamiento hidráulico reinician las operaciones. Cabe señalar que la programación propuesta se ve gravemente afectada por las limitaciones de agua fresca. Además, tenga en cuenta que el tiempo necesario para mover el equipo de fractura de la tripulación de un pozo al siguiente es de una semana. Cabe señalar que los almacenadores se instalan con el fin de recircular el agua, cuando otros pozos requieren agua se utiliza la mezcla de agua almacenada y fresca, para evitar solo reinyectar aguas residuales es preferible esperar y operar cuando la disponibilidad de agua está presente y reinyectar gradualmente una mezcla de agua fresca y residual.

**Tabla 4. 3. Programación de la fase de finalización en cada pozo en escenario A.**

<i>TRIPULACIÓN 1</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
1	1-5	6	6-8	9-20	21-37
2	7-11	12	12-14	15-26	27-43
3	13-17	18	18-20	21-32	33-49
4	19-23	24	24-26	27-38	39-55
5	27-31	32	32-34	35-46	47-63
6	33-37	38	38-40	41-52	53-69
7	39-43	44	44-46	47-58	59-75
8	45-49	50	50-52	53-64	65-81
<i>TRIPULACIÓN 2</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
9	1-5	6	6-8	9-20	21-37
10	7-11	12	12-14	15-26	27-43
11	13-17	18	18-20	21-32	33-49
12	19-23	24	24-26	27-38	39-55
13	32-36	37	37-39	40-51	52-68
14	38-42	43	43-45	46-57	58-74
15	44-48	49	49-51	52-63	64-80
<i>TRIPULACIÓN 3</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
16	5-9	10	10-12	13-24	25-41
17	11-15	16	16-18	19-30	31-47
18	17-21	22	22-24	25-36	37-53
19	36-40	41	41-43	44-55	56-72
20	42-46	47	47-49	50-61	62-78

### 4.3.2. Escenario B

La **Tabla 4.4** presenta la programación dada a ser considerada por este escenario. Cabe señalar que la tripulación 1 completa los pozos 1-7, la tripulación 2 completa los pozos 8-14 y la tripulación 3 completa los pozos 15-20. En este caso, las tres tripulaciones comienzan a trabajar simultáneamente desde la semana 1. Sin embargo, una vez más aproximadamente a mediados de año (semanas 24-26) ninguna tripulación puede operar debido a la escasez de agua.

**Tabla 4. 4. Programación de la fase de finalización en cada pozo en escenario B.**

<i>TRIPULACIÓN 1</i>					
<b>Pozo</b>	<b>FH (semanas)</b>	<b>Salida (semana)</b>	<b>FLOWBACK (1-3)</b>	<b>TRANSICIÓN (4-15)</b>	<b>PRODUCIDA (16-32)</b>
1	1-5	6	6-8	9-20	21-37
2	7-11	12	12-14	15-26	27-43
3	13-17	18	18-20	21-32	33-49
4	19-23	24	24-26	27-38	39-55
5	27-31	32	32-34	35-46	47-63
6	33-37	38	38-40	41-52	53-69
7	39-43	44	44-46	47-58	59-75
<i>TRIPULACIÓN 2</i>					
<b>Pozo</b>	<b>FH (semanas)</b>	<b>Salida (semana)</b>	<b>FLOWBACK (1-3)</b>	<b>TRANSICIÓN (4-15)</b>	<b>PRODUCIDA (16-32)</b>
8	1-5	6	6-8	9-20	21-37
9	7-11	12	12-14	15-26	27-43
10	13-17	18	18-20	21-32	33-49
11	19-23	24	24-26	27-38	39-55
12	27-31	32	32-34	35-46	47-63
13	33-37	38	38-40	41-52	53-69
14	39-43	44	44-46	47-58	59-75
<i>TRIPULACIÓN 3</i>					
<b>Pozo</b>	<b>FH (semanas)</b>	<b>Salida (semana)</b>	<b>FLOWBACK (1-3)</b>	<b>TRANSICIÓN (4-15)</b>	<b>PRODUCIDA (16-32)</b>
15	1-5	6	6-8	9-20	21-37
16	7-11	12	12-14	15-26	27-43
17	13-17	18	18-20	21-32	33-49
18	19-23	24	24-26	27-38	39-55
19	27-31	32	32-34	35-46	47-63
20	33-37	38	38-40	41-52	53-69

### 4.3.3. Escenario C

El cronograma, en este caso, se da en la **Tabla 4.5**. La diferencia más importante en este escenario está relacionada con la operación de la tripulación 3, que inicia operaciones a mediados de año. Por esta razón, la tripulación 3 solo opera 4 pozos. Mientras que la tripulación 1 y 2 operan simultáneamente desde la semana 1 hasta la semana 49 y ambas consideran la escasez de agua.

**Tabla 4. 5. Programación de la fase de finalización en cada pozo en escenario C.**

<i>TRIPULACIÓN 1</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
1	1-5	6	6-8	9-20	21-37
2	7-11	12	12-14	15-26	27-43
3	13-17	18	18-20	21-32	33-49
4	19-23	24	24-26	27-38	39-55
5	27-31	32	32-34	35-46	47-63
6	33-37	38	38-40	41-52	53-69
7	39-43	44	44-46	47-58	59-75
8	45-49	50	50-52	53-64	65-81
<i>TRIPULACIÓN 2</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
9	1-5	6	6-8	9-20	21-37
10	7-11	12	12-14	15-26	27-43
11	13-17	18	18-20	21-32	33-49
12	19-23	24	24-26	27-38	39-55
13	27-31	32	32-34	35-46	47-63
14	33-37	38	38-40	41-52	53-69
15	39-43	44	44-46	47-58	59-75
16	45-49	50	50-52	53-64	65-81
<i>TRIPULACIÓN 3</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
17	27-31	32	32-34	35-46	47-63
18	33-37	38	38-40	41-52	53-69
19	39-43	44	44-46	47-58	59-75
20	45-49	50	50-52	53-64	65-81

#### 4.3.4. Escenario D

Este caso considera la disposición de la operación que se muestra en la **Tabla 4.6**. De manera similar al escenario B, los tres equipos de *fracking* inician la operación en la semana 1; sin embargo, en este caso, la tripulación 3 solo trabaja el primer semestre.

**Tabla 4. 6. Programación de la fase de finalización en cada pozo en escenario D.**

<i>TRIPULACIÓN 1</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
1	1-5	6	6-8	9-20	21-37
2	7-11	12	12-14	15-26	27-43
3	13-17	18	18-20	21-32	33-49
4	19-23	24	24-26	27-38	39-55
5	27-31	32	32-34	35-46	47-63
6	33-37	38	38-40	41-52	53-69
7	39-43	44	44-46	47-58	59-75
8	45-49	50	50-52	53-64	65-81
<i>TRIPULACIÓN 2</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
9	1-5	6	6-8	9-20	21-37
10	7-11	12	12-14	15-26	27-43
11	13-17	18	18-20	21-32	33-49
12	19-23	24	24-26	27-38	39-55
13	27-31	32	32-34	35-46	47-63
14	33-37	38	38-40	41-52	53-69
15	39-43	44	44-46	47-58	59-75
16	45-49	50	50-52	53-64	65-81
<i>TRIPULACIÓN 3</i>					
Pozo	FH (semanas)	Salida (semana)	FLOWBACK (1-3)	TRANSICIÓN (4-15)	PRODUCIDA (16-32)
17	1-5	6	6-8	9-20	21-37
18	7-11	12	12-14	15-26	27-43
19	13-17	18	18-20	21-32	33-49
20	19-23	24	24-26	27-38	39-55

#### 4.4. Resultados

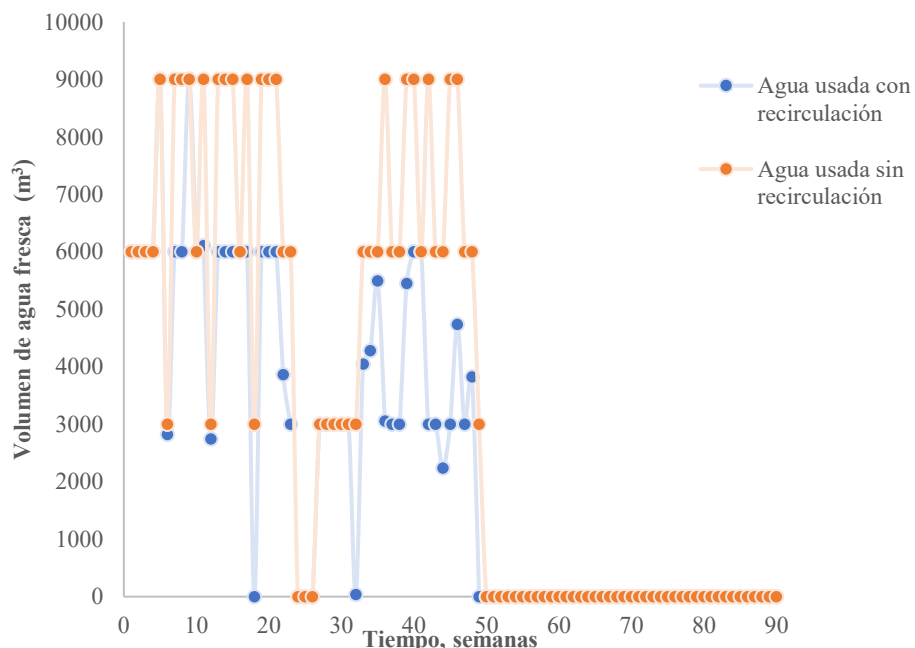
Una vez implementado el enfoque matemático propuesto y considerando toda la información anterior, se pueden obtener los siguientes resultados. En primer lugar, la **Tabla 4.7** muestra los resultados obtenidos en términos de *TWR* y *TC* (incluida su composición detallada) para los cuatro escenarios (A, B C y D). En el Escenario D, el consumo de agua fresca es el más bajo; por lo tanto, involucra la mayor cantidad de agua almacenada para recircular (a la fractura hidráulica) y como consecuencia, las corrientes de agua más bajas en las unidades de tratamiento y reúso. A este escenario también se le ha asociado el menor valor de *TC* (esto se puede explicar considerando que requiere la menor cantidad de *TWR* gracias a la recirculación, si bien el agua tratada puede ser reusada, su precio de venta no compensa los costos de capital y operación para unidades de tratamiento). De lo contrario, la solución para el escenario C implica el mayor valor

para *TWR* y al mismo tiempo el mayor *TC*, así como la mayor cantidad de agua reusada (evitando en la medida de lo posible la recirculación, que representa una desventaja significativa). En este sentido, el escenario C también es el escenario con mayor valor agregado para el agua tratada debido a la venta de corrientes de aguas residuales tratadas. Los escenarios A y B representan soluciones intermedias entre escenarios optimistas y pesimistas. Cabe mencionar que el agua de salida de los pozos es la misma para todos los escenarios porque en todos los escenarios eventualmente se fracturan 20 pozos con los mismos requerimientos de agua y cantidades de agua que regresan a la superficie. Por lo tanto, el escenario D utiliza la menor cantidad de agua fresca y se ahorra un 32.43%. En este sentido, el escenario C utiliza solo 212,983.61 m<sup>3</sup> de agua fresca, con lo que se ahorra un 29.00%. En esta tabla se incluyen los resultados en cuanto a las corrientes de aguas residuales que salen de los pozos y se reúsan, donde el escenario D representa la solución con menor cantidad de agua reusada (12.26%). Por el contrario, el escenario C reutiliza el 18.30% del agua total que sale de los pozos; porque utiliza una mayor cantidad de agua fresca y a su vez no recircula una gran cantidad, por lo que tiene la opción de tratar y reusar inmediatamente mayor cantidad de agua residual (considerar que la cantidad original requerida sin recirculación en todos los escenarios es de 300,000.00 m<sup>3</sup> en el fin de la explotación de todos los pozos y que debe reducirse mediante el uso del sistema de recirculación). Uno de los puntos importantes con lo que se han tenido las soluciones anteriores, están relacionadas con lo que desde un principio se tomó como caso de estudio que es el cronograma de fractura hidráulica para un conjunto de pozos, el escenario D considera el *fracking* de las tres tripulaciones como simultáneas (es decir, los tres equipos fracturan desde la primer semana) debido a ello el agua saliente en la semana 6 (considerando que la fractura tarda 5 semanas) comienza a ser almacenada para su recirculación en los pozos que se fracturan inmediatamente, con ello se logra utilizar menor cantidad de agua fresca y a su vez tratar menor cantidad de agua para reúso, debido a que gran cantidad se almacena. De lo contrario en el escenario C solo dos tripulaciones trabajan simultáneamente y la tripulación restante (que opera hasta después de la sequía) no está aprovechando el agua saliente de la fractura, por lo que se manda mayor cantidad de agua a reúso y menor cantidad a almacenamiento.

**Tabla 4. 7. Configuración resultante para cada escenario con un *TC* mínimo.**

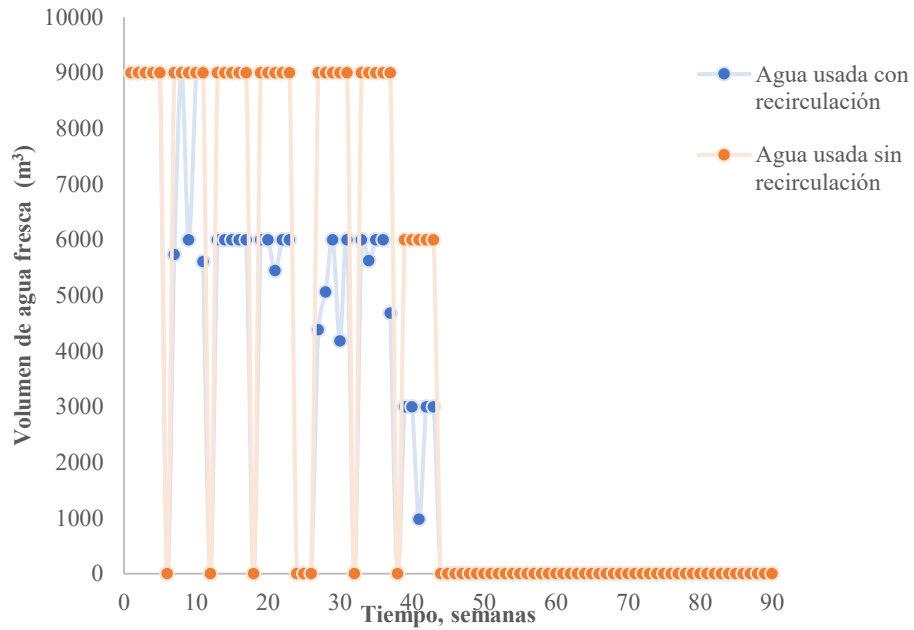
CONCEPTO	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	ESCENARIO D
Agua fresca utilizada sin recirculación (m <sup>3</sup> )	300,000.00	300,000.00	300,000.00	300,000.00
Agua fresca utilizada con recirculación (TWR) (m <sup>3</sup> )	204,686.65	206,707.41	212,983.61	202,700.96
Porcentaje de agua fresca ahorrada (%)	31.77	31.09	29.00	32.43
TOC (\$)	2.69E+06	2.67E+06	2.82E+06	2.66E+06
TCC (\$)	41,833.91	49,235.91	48,177.73	49,216.53
TVC (\$)	11,938.61	13,424.50	17,731.93	11,840.83
TC (\$)	2.720E+06	2.708E+06	2.850E+06	2.697E+06
Agua flowback reusada(m <sup>3</sup> )	3,847.23	5,455.46	8,288.18	5,455.46
Agua transición reusada (m <sup>3</sup> )	6,583.25	6,065.98	7,375.54	4,917.02
Agua producida reusada (m <sup>3</sup> )	4,707.98	5,193.55	5,905.54	4,075.68
Total de agua reusada (m <sup>3</sup> )	15,138.45	16,714.99	21,569.25	14,448.16
Agua de salida total de los <i>n</i> pozos (m <sup>3</sup> )	117,881.40	117,881.40	117,881.40	117,881.40
Porcentaje de agua reusada con respecto a la de salida (%)	12.84	14.18	18.30	12.26

En la **Figura 4.1** se muestra una comparación de la cantidad de agua necesaria considerando sistemas de recirculación o cuando estas opciones de recirculación no se utilizan en el escenario A. Como puede verse, de la semana 49 a la 90 los requerimientos de agua fresca son nulos debido a que en estas semanas no se completan pozos de acuerdo con el cronograma propuesto, donde el último pozo en fracturarse es el pozo número 8 para la tripulación 1; También tenga en cuenta que la semana con mayor cantidad de requerimientos de agua es la semana 5 con 8,999.97 m<sup>3</sup> (en esta semana, las 3 tripulaciones operan simultáneamente). Recordando que durante las semanas 24-26 tampoco se requiere agua fresca porque no hay tripulación operando por escasez de agua. La cantidad requerida con recirculación en el escenario A es 204,686.65 m<sup>3</sup> (esto se obtiene sumando todos los puntos azules que se muestran en la figura) con un ahorro de agua fresca no utilizada de 95,312.35 m<sup>3</sup> (comparado con la cantidad original de agua requerida que sería utilizado sin recirculación).



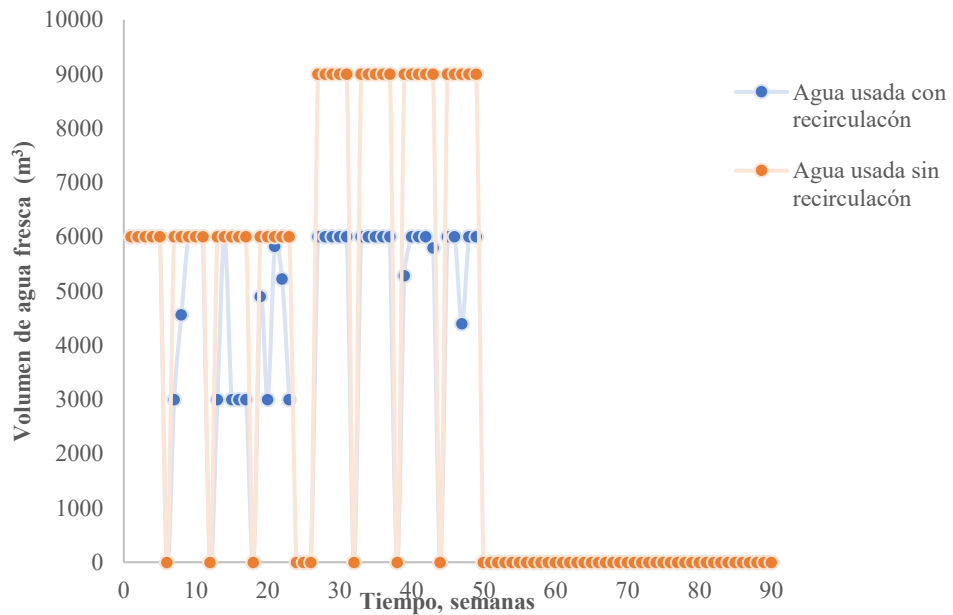
**Figura 4. 1. Consumo de agua fresca en escenario A.**

De manera similar a la **Figura 4.1**, las **Figuras 4.2, 4.3 y 4.4** muestran las comparaciones entre la consideración o no de los sistemas de recirculación para los escenarios B, C y D, respectivamente. En este contexto, en la **Figura 4.2** se visualiza el requerimiento de agua fresca con recirculación, que es de  $206.707,41 \text{ m}^3$  (suma de todos los puntos azules mostrados en la figura anterior), logrando un ahorro de  $93.291,59 \text{ m}^3$ . Asimismo, se puede observar que la última semana en la que se requiere agua es en la 43 por lo que es la semana en la que se completa el último pozo.



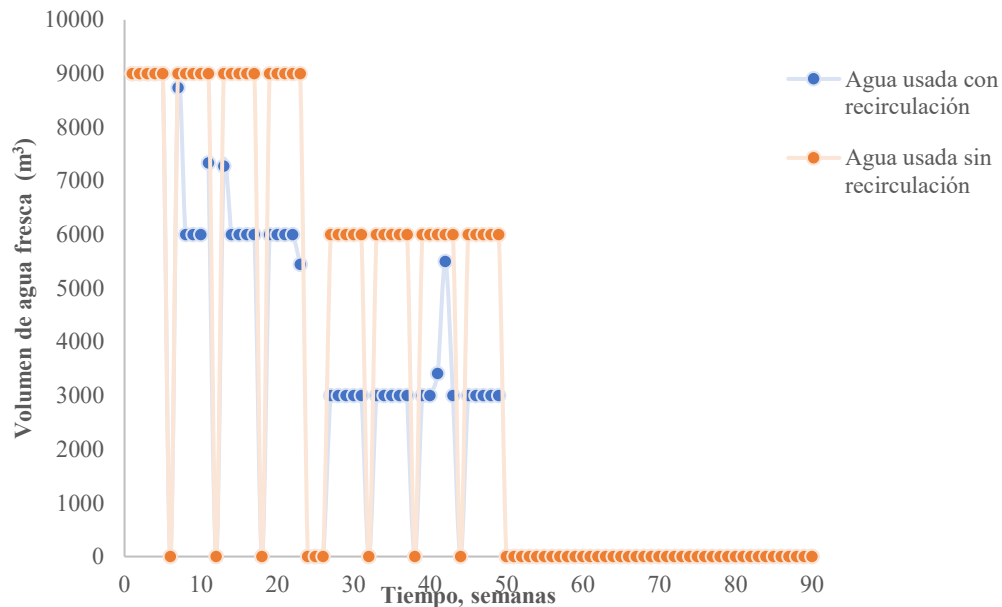
**Figura 4. 2. Consumo de agua fresca en escenario B.**

La **Figura 4.3** muestra que la cantidad de agua ahorrada con el sistema de recirculación en fosas es de 87,015.39 m<sup>3</sup> para el escenario C.



**Figura 4. 3. Consumo de agua fresca en escenario C.**

Finalmente, en la **Figura 4.4** se puede observar que la cantidad de agua requerida con el sistema de recirculación es de 202,700.96 m<sup>3</sup> y los requerimientos de agua desde la semana 50 hasta la última son cero. Las necesidades de agua para la semana 27 a la 49 son de 3,000 m<sup>3</sup> y antes del período de escasez las necesidades fluctúan entre 6,000 m<sup>3</sup> y 9,000 m<sup>3</sup>.



**Figura 4. 4. Consumo de agua fresca en escenario D.**

La **Tabla 4.8** muestra la cantidad de agua residual que ingresa a cada sistema de almacenamiento, tratamiento y reúso después de que regresan a la superficie durante el horizonte de tiempo total. De acuerdo con los requerimientos totales de agua y las porciones estimadas de agua que regresan a la superficie como agua *flowback*, transición y producida, se recupera un total de 117,881.40 m<sup>3</sup> de aguas residuales en cada escenario. En esta tabla se establece el destino de cada flujo de agua residual en cada opción y para cada escenario. Cabe señalar que esta información puede ser útil para determinar el impacto ambiental (es decir, se especifican las cantidades de agua que se recircula o reusa para cada tipo de agua residual). Además, el escenario A muestra un mayor porcentaje de agua reusada (durante las semanas 50 a 64), donde 6,583.25 m<sup>3</sup> provienen de aguas de transición y el total de agua reusada para los tres tipos es de 15,138.45 m<sup>3</sup>, lo que representa el 12.84% del total de agua retornada al final de la fractura hidráulica de los 20 pozos. El escenario B logra reusar 16,714.99 m<sup>3</sup> del total de agua residual, lo que representa el 14.18%, donde 6,065.98 m<sup>3</sup> corresponde a agua de transición durante las semanas 44 a 58. El Escenario C reusa la mayor cantidad de agua *flowback* (8,288.18 m<sup>3</sup>) en las semanas 50 a 52, con

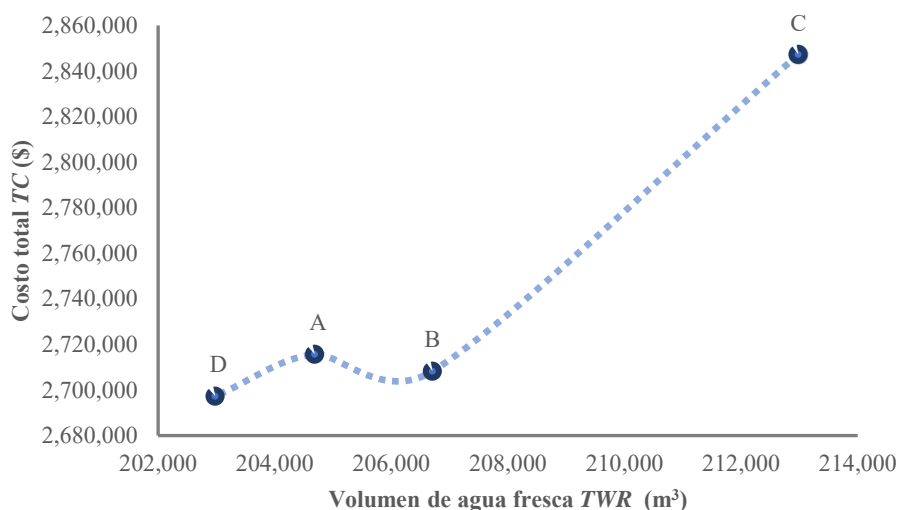
un 18.3% del total de agua recuperada a la salida del conjunto de pozos. Sin embargo, el escenario que menos reusa es el D con 12.26%, lo que representa 14,448.16 m<sup>3</sup> del total de corrientes de agua de salida (117,881.40 m<sup>3</sup>), donde el mayor proveedor de esta agua reusada es *flowback* (durante las semanas 50 a 52) y representa 5,455.46 m<sup>3</sup> de agua residual.

**Tabla 4. 8. Agua residual al mínimo TC.**

<i>Escenario A</i>					
CLASIFICACIÓN	ALMACENADOR	TRATAMIENTO	REÚSO	TOTAL	%REÚSO
Flowback (m <sup>3</sup> )	57,397.63	4,371.85	3,847.23	61,769.48	6.23
Transición (m <sup>3</sup> )	27,228.60	9,143.40	6,583.25	36,372.00	18.10
Producida (m <sup>3</sup> )	10,686.20	9,053.80	4,707.98	19,740.00	23.85
<i>Escenario B</i>					
CLASIFICACIÓN	ALMACENADOR	TRATAMIENTO	REÚSO	TOTAL	% REÚSO
Flowback (m <sup>3</sup> )	55,592.46	6,176.94	5,455.46	61,769.40	8.83
Transición (m <sup>3</sup> )	27,946.80	8,425.20	6,065.98	36,372.00	16.68
Producida (m <sup>3</sup> )	9,752.40	9,987.60	5,193.55	19,740.00	26.31
<i>Escenario C</i>					
CLASIFICACIÓN	ALMACENADOR	TRATAMIENTO	REÚSO	TOTAL	% REÚSO
Flowback (m <sup>3</sup> )	52,503.99	9,265.41	8,288.18	61,769.40	13.42
Transición (m <sup>3</sup> )	26,128.20	10,243.80	7,375.54	36,372.00	20.28
Producida (m <sup>3</sup> )	8,383.20	11,356.80	5,905.54	19,740.00	29.92
<i>Escenario D</i>					
CLASIFICACIÓN	ALMACENADOR	TRATAMIENTO	REÚSO	TOTAL	% REÚSO
Flowback (m <sup>3</sup> )	55,592.46	6,176.94	5,455.46	61,769.40	8.83
Transición(m <sup>3</sup> )	29,542.80	6,829.20	4,917.02	36,372.00	13.52
Producida (m <sup>3</sup> )	11,881.80	7,858.20	4,075.68	19,740.00	20.65

Además, para comparar soluciones multio-bjetivo económicas y ambientales (*TC* vs *TWR*), se aplicó un enfoque de solución de compensación para determinar el siguiente diagrama (ver **Figura 4.5**). Cabe señalar que la información para realizar esta figura se puede encontrar en la **Tabla 4.7**, este diagrama se construye de la siguiente manera: el punto con el *TC* mínimo e incluso con el *TWR* mínimo se identifica por la solución D (este es el mejor escenario). De lo contrario, el caso contrario está representado por el punto C, donde los valores de *TWR* y *TC* se deterioran significativamente, y es el peor de los casos. Mientras que las soluciones A y B representan soluciones intermedias. La **Figura 4.5** muestra que el comportamiento de la curva de D a C tiene asociada una pendiente positiva; significa que el objetivo económico disminuye si el

objetivo ambiental disminuye, esta situación implica que ambas metas apuntan en la misma dirección.



**Figura 4. 5. Curva de compensación TC vs TWR para los escenarios A-D.**

Otro aspecto importante involucrado en el proyecto es la cantidad de unidades de tratamiento y almacenamiento requeridas para garantizar el correcto funcionamiento del proceso de fracturamiento hidráulico en los casos de estudio antes mencionados. En este contexto, la **Tabla 4.9** muestra las unidades de tratamiento necesarias que se deben instalar para cada escenario, donde la unidad de tratamiento 1 corresponde a destilación por membranas y la 2 a ósmosis directa, así como el número de unidades de tratamiento y almacenamiento para los diferentes tipos de agua. Como se puede ver a continuación, en todos los escenarios se opta por utilizar unidades de tratamiento de ósmosis directa para los tres tipos de agua porque es una tecnología más económica a excepción de los escenarios B, C y D en donde también se utilizan las unidades de tratamiento de destilación por membranas, esto debido a que las semanas en las que mayor cantidad de agua se trata es del tipo *flowback* y se opta por utilizar dos unidades de tratamiento debido a los caudales de agua.

**Tabla 4. 9. Número de unidades de almacenamiento y tratamiento existentes.**

CONCEPTO	ESCENARIO A	ESCENARIO B	ESCENARIO C	ESCENARIO D
<i>Unidades existentes</i>				
Unidad de tratamiento agua flowback				
1	No	Si	Si	Si
2	Si	Si	Si	Si
Unidad de tratamiento agua transición				
1	No	No	No	No
2	Si	Si	Si	Si
Unidad de tratamiento agua producida				
1	No	No	No	No
2	Si	Si	Si	Si
<i>Número de unidades</i>				
Tratamiento de agua flowback	1	2	2	2
Tratamiento de agua transición	1	1	1	1
Tratamiento de agua producida	1	1	1	1
Almacenamiento de agua flowback	1	1	1	1
Almacenamiento de agua transición	1	1	1	1
Almacenamiento de agua producida	1	1	1	1

En trabajos previos el agua se desecha generando un problema ambiental, en este trabajo estamos abordando el problema, de tal manera que no generemos caudales al recircular y reusar el agua, sin generar corrientes residuales y por otro lado teniendo un beneficio económico al momento de vender el agua para diferentes reúsos, uno de los trabajos de investigación anteriores [10], ha estudiado la fracturación hidráulica sin reusar el agua tratada, según el caso de estudio A que con el mismo cronograma (a efectos prácticos, se realiza la comparación de un único escenario que tiene características similares en ambas obras) tiene un costo total de \$ 3,183,245 y un consumo de agua fresca de 237,089 m<sup>3</sup>, mientras que en el escenario A del presente trabajo tiene un costo total de \$ 2,720,000 y un consumo de agua fresca de 204,686.65 m<sup>3</sup>, cabe señalar que en esta obra existe un ingreso adicional por la venta de agua para su reúso, que en este escenario particular es de \$ 11,938.61. Analizando lo anterior, se puede resaltar que con la utilización de la superestructura propuesta estamos teniendo un ahorro adicional al que ya se había estudiado en obras anteriores de 10.8% más de agua fresca, un ahorro de \$ 463,000 y un volumen de 15,138.45m<sup>3</sup> (lo que representa 7.39 % del agua inyectada) de agua que fue reusada en lugar de desechada, reduciendo así la carga ambiental y teniendo un ingreso económico extra.

También es importante destacar que además de tener un ahorro económico importante, se está teniendo un aporte importante en el aspecto ambiental al utilizar menos agua fresca y al reusar el agua en lugar de desecharla, teniendo un beneficio económico con la venta de agua.

#### 4.5. Discusión y análisis

Este trabajo ha presentado una formulación de programación matemática para la planificación óptima de la red de agua en operaciones de *fracking* relacionadas con la industria de gas *shale* para explotar un conjunto de pozos considerando preocupaciones económicas y ambientales. La formulación del modelo propuesto requiere una programación fija para las tripulaciones que operan la fractura hidráulica y cuantifica los requerimientos de agua fresca para el proyecto. La función objetivo económico consiste en la minimización del costo total que se compone de costos operativos y costos de capital. El objetivo ambiental abordado es la minimización del consumo de agua fresca, que se requiere para llevar a cabo la fractura hidráulica y el agua residual se almacena, reusa o recircula. El proceso de optimización determina la cantidad de tecnologías de tratamiento y unidades de almacenamiento requeridas en la configuración óptima, así como sus capacidades. El modelo considera las limitaciones asociadas con el agua fresca disponible en diferentes estaciones durante el año. Este aspecto también afecta la programación de la terminación del pozo. La superestructura propuesta permite una gestión eficiente de las aguas residuales que puede ahorrar líquido y recircular por períodos de tiempo con problemas de escasez de agua. El enfoque propuesto se aplicó a escenarios asociados con los campos Marcellus y Barnett y considerando diferentes cronogramas dados.

Los resultados destacan los beneficios de considerar la metodología propuesta para el manejo de aguas residuales, ya que permite que un mayor número de pozos se puedan completar con menores cantidades de agua fresca y menores costos. Haciendo una comparación entre los resultados para los escenarios propuestos, en el aspecto económico, es más conveniente que las cuadrillas trabajen simultáneamente sin esperar que pase la sequía (semanas 24-26) y completen inmediatamente los pozos (escenario D). Dentro del aspecto ambiental en términos de agua fresca, el escenario D implica el menor valor debido a que este caso recircula la mayor cantidad posible de agua. El escenario C es la solución con la mayor cantidad de agua reusada, pero al mismo tiempo requiere el valor más alto de los requisitos de agua fresca, debido a que una

cantidad menor a las del escenario D es recirculada y manda a unidades de tratamiento mayor volumen de agua. Los escenarios A y B representan soluciones intermedias en los aspectos económicos y ambientales. El enfoque propuesto logra importantes beneficios en términos de reducciones del costo total (*TC*) y los requerimientos totales de agua (*TWR*); específicamente, el escenario D disminuye el 32.43% de los requerimientos de agua fresca donde se reusa el 12.26% de la producción total de agua en los pozos. Adicionalmente, es posible alcanzar un ahorro de \$ 160,000 en costo total en comparación con el escenario menos factible (C). El diagrama de compensación muestra que es posible obtener un beneficio económico-ambiental al mismo tiempo. Los resultados apoyan la planificación en la explotación de gas *shale* con ahorros económicos y con un bajo impacto ambiental. Se muestra la novedad del trabajo en la clasificación de las aguas residuales y el uso del agua fresca de forma adecuada por ser uno de los grandes retos en la fractura hidráulica.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se ha presentado un modelo de optimización para el uso de agua *flowback*, transición y producida en los procesos de fractura hidráulica. El modelo consideró aspectos económicos dentro de los cuales destaca el costo total requerido para satisfacer las grandes necesidades de agua en las operaciones de gas *shale*. Dentro de los aspectos ambientales se realizó un análisis para los requerimientos de agua fresca, así como la gestión de agua residual en las distintas operaciones de almacenamiento, tratamiento y reúso.

Basando esta investigación en los resultados obtenidos y reportados en el capítulo IV y de acuerdo con el código desarrollado en GAMS®, se concluye lo siguiente:

- a) Los resultados destacan los beneficios de considerar la metodología propuesta para el manejo de aguas residuales, ya que permite un mayor número de pozos que se pueden completar con menores cantidades de agua fresca y menores costos.
- b) Haciendo una comparación entre los resultados para los escenarios propuestos, en el aspecto económico, es más conveniente que las tripulaciones trabajen simultáneamente sin esperar a que pase la sequía (semanas 24-26) y completen inmediatamente los pozos (escenario D).
- c) El escenario D implica el menor valor para el consumo de agua fresca (202,700.96 m<sup>3</sup>) debido a que recircula la mayor cantidad posible de agua.
- d) El escenario C es la solución con la mayor cantidad de agua reusada con un 18.30% que corresponde a 21,569.25 m<sup>3</sup>, pero al mismo tiempo establece los requerimientos más altos de agua fresca (212,983.61 m<sup>3</sup>).
- e) Los escenarios A y B representan soluciones intermedias.
- f) El enfoque propuesto logra importantes beneficios en términos de reducciones del costo total (*TC*) y los requerimientos totales de agua (*TWR*); el escenario D disminuye 32.43% de los requerimientos de agua fresca donde se reúsa el 12.26% de la producción total de agua residual en los pozos.
- g) Es posible alcanzar un ahorro de \$ 160,000 en costo total en comparación con el peor escenario (C).

- h) El diagrama de compensación muestra que es posible obtener un beneficio económico-ambiental al mismo tiempo.
- i) Los resultados apoyan la planificación en la explotación de gas *shale* con ahorros económicos y con un bajo impacto ambiental.
- j) La hipótesis se acepta.

Se desarrolló un modelo matemático para la gestión de agua en la explotación de yacimientos de gas *shale*. Generalizando, el modelo matemático planteado en esta investigación realiza predicciones acerca de costos e impacto ambiental, ahorrando así recursos y tiempo. Es un modelo que se puede ajustar a cualquier caso de estudio dado. Por otro lado, es importante destacar que la principal novedad de este trabajo es la clasificación del agua residual (*flowback*, transición y producida) y el uso del agua de forma adecuada por ser uno de los grandes retos de la fractura hidráulica, evitando la generación de corrientes residuales y teniendo un beneficio económico en la venta de agua tratada, así como el reúso de esta agua que antes solo podía ser considerada como residuo nocivo para el medio ambiente. Mientras que en otros trabajos se descarta el agua generando un problema ambiental y no aprovechando económicamente, en el presente trabajo se aborda la problemática ambiental y económica a través del tratamiento y reúso de aguas residuales. Es importante realizar este tipo de estudios previos a la fractura hidráulica, que consideren la clasificación de la gestión de aguas, ya que no se ha considerado ni implementado en la práctica, y así tener la posibilidad de ayudar al medio ambiente en el futuro. En este trabajo de investigación se consideró la clasificación de agua residual porque el objetivo principal del trabajo es estudiar el efecto de considerar el agua en distintas vertientes para especificar si podría o no tener alguna ventaja ambiental y económica, sin embargo no se considera un índice como tal para medir el impacto ambiental de la fractura hidráulica y tampoco las concentraciones de cada tipo de compuesto químico; los trabajos futuros podrían tomar en cuenta este impacto, por otro lado también podrían contemplar la concentración de sólidos disueltos y químicos en los distintos tipos de agua residual, añadiendo las restricciones que consideren las concentraciones al modelo matemático.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Navarro A de la V., Ramírez-Villegas J., 2015, “El gas de lutitas (shale gas) en México. Recursos, explotación, usos, impactos”, *Economía UNAM*, 12-34:79-105. DOI:10.1016/S1665-952X(15)30006-2
- [2] U.S. Energy Information Administration (EIA) 2015. <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>
- [3] U.S. Energy Information Administration (EIA) Natural gas explained Where our natural gas comes from 2021. <https://www.eia.gov/energyexplained/natural-gas/where-our-natural-gas-comes-from.php>
- [4] Al-Douri A., Sengupta D., El-Halwagi M. M., 2017, “Shale Gas Monetization - A Review of Downstream Processing to Chemicals and Fuels”, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 45, 436-455, DOI: 10.1016/j.jngse.2017.05.016
- [5] Serrano-Arévalo T. I., Juárez-García M., Ponce-Ortega J. M., 2020, “Optimal Planning for Satisfying Future Electricity Demands Involving Simultaneously Economic, Emissions, and Water Concerns”, *Process Integration and Optimization for Sustainability*, 4, 379–389, DOI: 10.1007/s41660-020-00125-8
- [6] U.S. Energy Information Administration (EIA) Annual Energy Outlook 2021. Washington, DC: US Department of Energy. [https://www.eia.gov/pressroom/presentations/AEO2021\\_Release\\_Presentation.pdf](https://www.eia.gov/pressroom/presentations/AEO2021_Release_Presentation.pdf)
- [7] Arredondo-Ramírez K., Ponce-Ortega J. M., El-Halwagi M. M., 2016, “Optimal Planning and Infrastructure Development for Shale Gas Production”, *Energy Conversion and Management*, 119, 91-100, DOI: 10.1016/j.enconman.2016.04.038
- [8] Hannibal B., Portney K., 2020, “The Impact of Water Scarcity on Support for Hydraulic Fracturing Regulation: A Water-Energy Nexus Study”, *Energy Policy*, 146, 111718, DOI: 10.1016/j.enpol.2020.111718
- [9] Yin Y., Tang Q., Liu X., Zhang X., 2017, “Water Scarcity Under Various Socio-Economic Pathways and its Potential Effects on Food Production in the Yellow River Basin”, *Hydrology and Earth System Sciences*, 21-2, 791–804, DOI: 10.5194/hess-21-791-2017

- [10] Lira-Barragan L. F., Ponce-Ortega J. M., Serna-González M., El-Halwagi M. M., 2016, “Optimal Reuse of Flowback Wastewater in Hydraulic Fracturing Including Seasonal and Environmental Constraints”, *AIChE Journal*, 62-5, 1634-1645, DOI: 10.1002/aic.15167
- [11] Sun Y., Wang D., Tsang D. C. W., Wang L., Ok Y. S., Feng Y. A., 2019, “Critical Review of Risks, Characteristics, and Treatment Strategies for Potentially Toxic Elements in Wastewater from Shale Gas Extraction”, *Environment International*, 125, 452-469, DOI: 10.1016/j.envint.2019.02.019
- [12] Shaffer D. L., Arias-Chavez L. H., Ben-Sasson M., Romero-Vargas Castrillón S., Yip N. Y., 2013, “Elimelech, M. Desalination and Reuse of High Salinity Shale Gas Produced Water: Drivers, Technologies, and Future Directions”, *Environmental Science and Technology*, 47-17, 9569–9583, DOI: 10.1021/es401966e
- [13] Phan T. T., Paukert Vankeuren A. N., Hakala J. A., 2018, “Role of water-rock interaction in the geochemical evolution of Marcellus Shale produced waters”, *International Journal of Coal Geology*, 191, 95-111, DOI: 10.1016/j.coal.2018.02.014
- [14] Zolfaghari A., Tang Y., Holyk J., Binazadeh M., Dehghanpour H., Bearinger D., 2015, “Advances in Flowback Chemical Analysis of Gas Shales. Paper Presented at the SPE”, *Annual Technical Conference and Exhibition*, Houston, Texas, USA. DOI: 10.2118/175154-MS
- [15] Hernández-Pérez L. G., Lira-Barragán L. F., Ponce-Ortega J. M., 2020, “Hybrid Multiobjective Optimization Using Deterministic and Metaheuristic Techniques for Flowback Water Reusing in Hydraulic Fracturing Processes”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 59, 15298-15308, DOI: 10.1021/acs.iecr.0c02867
- [16] Yang X., Liu S., Zhang L., Su J., Ye T., 2020, “Design and Analysis of a Renewable Energy Power System for Shale Oil Exploitation Using Hierarchical optimization”, *Energy*, 206, 118078, DOI: 10.1016/j.energy.2020.118078
- [17] Zhang X., Sun A. Y., Duncan I. J., Vesselinov V. V., 2017, “Two-Stage Fracturing Wastewater Management in Shale Gas Development”, *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 56(6), 1570-1579, DOI: 10.1021/acs.iecr.6b03971
- [18] Manzanares-Rivera J. L., 2014, “Uso de agua en la extracción de gas de lutitas en el noreste de México: Retos de regulación ambiental”, *Estudios sociales (Hermosillo,*

- Son.*), 22-44, 172-197, DOI:  
[http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S018845572014000200007](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S018845572014000200007)
- [19] Haluszczak L. O., Rose A. W., Kump L. R., 2013, “Geochemical Evaluation of Flowback Brine from Marcellus Gas Wells in Pennsylvania USA”, *Applied Geochemistry*, 28, 55-61, DOI: 10.1016/j.apgeochem.2012.10.002
- [20] PDEP (2010) Pennsylvania Department of Environmental Protection, "Hydraulic fracturing overview" Frac Focus, Ground Water Protection Council/Interstate Oil and Gas Compact Commission.
- [21] Middleton R. S., Gupta R., Hyman J. D., Viswanathan H. S., 2017, “The Shale Gas Revolution: Barriers, Sustainability, and Emerging Opportunities”, *Applied Energy*, 199, 88–95. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.04.03
- [22] Bai B., Carlson K., Prior A., Douglas C., 2015, “Sources of Variability in Flowback and Produced Water Volumes from Shale Oil and Gas Wells”, *Journal of Unconventional Oil and Gas Resources*, 12, 1-5, DOI: 10.1016/j.juogr.2015.07.001
- [23] Slutz J. A., Anderson J. A., Broderick R., Horner P. H., 2012, Key Shale Gas water management strategies: an economic assessment tool. SPE/APPEA International Conference on Health, Safety, and Environment in Oil and Gas Exploration and Production, Perth, Australia. DOI:10.2118/157532-MS

## APÉNDICES

### Código GAMS®

\$TITLE SHALE GAS FLOWBACK-TRANSICION-PRODUCIDA

OPTION OPTCR=0.010;

OPTION OPTCA=.010;

SETS

N	WELL A FRACTURAR	/1*20/
N1(N)	SUBSET CONJUNTO 1 DE WELLS	/1*8/
N2(N)	SUBSET CONJUNTO 2 DE WELLS	/9*15/
N3(N)	SUBSET CONJUNTO 3 DE POZOS	/16*20/
F	TRATAMIENTOS AGUA FLOWBACK	/1*2/
M	TRATAMIENTOS AGUA TRANSICION	/1*2/
P	TRATAMIENTOS AGUA PRODUCIDA	/1*2/
C	ALMACENADORES AGUA FLOWBACK	/1*1/
D	ALMACENADORES AGUA TRANSICION	/1*1/
G	ALMACENADORES AGUA PRODUCIDA	/1*1/
B	REUSOS AGUA FLOWBACK	/1*1/
A	REUSOS AGUA TRANSICION	/1*1/
E	REUSOS AGUA PRODUCIDA	/1*1/
T	PERIODO DE TIEMPO (FH)	/1*90/
FT	TIEMPO DE DURACIÓN DEL FLOWBACK	/1*3/
TT	TIEMPO DE DURACIÓN DE LA TRANSICIÓN	/1*4/
PT	TIEMPO DE DURACIÓN DE LA PRODUCIDA	/1*4/

;

BINARY VARIABLES

YTREAT_FLOWBACK(F)	EXISTENCIA DE TRATAMIENTO F
YTREAT_TRANS(M)	EXISTENCIA DE TRATAMIENTO M
YTREAT_PROD(P)	EXISTENCIA DE TRATAMIENTO P
YSTO_FLOWBACK(C)	EXISTENCIA DE ALMACENADOR C
YSTO_TRANS(D)	EXISTENCIA DE ALMACENADOR D
YSTO_PROD(G)	EXISTENCIA DE ALMACENADOR G;

POSITIVE VARIABLES

FFRESH(T)	FLUJO DE AGUA FRESCA
FFFRESH(N,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE AGUA FRESCA AL WELL
FFSTORAGE_FLOWBACK(C,N,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE ALMACENADOR A WELL FLOWBACK
FFSTORAGE_TRANS(D,N,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE ALMACENADOR A WELL TRANSICION
FFSTORAGE_PROD(G,N,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE ALMACENADOR A WELL PRODUCIDA
FFWELL_TREAT_FLOWBACK(N,F,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE WELL A TRATAMIENTO FLOWBACK
FFWELL_STO_FLOWBACK(N,C,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE WELL A ALMACENADOR FLOWBACK
FFWELL_TREAT_TRANS(N,M,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE WELL A TRATAMIENTO TRANSICION
FFWELL_STO_TRANS(N,D,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE WELL A ALMACENADOR TRANSICION
FFWELL_TREAT_PROD(N,P,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE WELL A TRATAMIENTO PRODUCIDA
FFWELL_STO_PROD(N,G,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE WELL A ALMACENADOR PRODUCIDA
FTREAT_IN_FLOWBACK(F,T)	FLUJO ALIMENTADO A TRATAMIENTO FLOWBACK
FTREAT_IN_TRANS(M,T)	FLUJO ALIMENTADO A TRATAMIENTO TRANSICION
FTREAT_IN_PROD(P,T)	FLUJO ALIMENTADO A TRATAMIENTO PRODUCIDA
***	
FTREAT_OUT_FLOWBACK(F,T)	FLUJO DE SALIDA DEL TRATAMIENTO FLOWBACK
FTREAT_OUT_TRANS(M,T)	FLUJO DE SALIDA DEL TRATAMIENTO TRANCISION
FTREAT_OUT_PROD(P,T)	FLUJO DE SALIDA DEL TRATAMIENTO PRODUCIDA
FFTREAT_REU_FLOWBACK(F,B,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE TRATAMIENTO A REUSO FLOWBACK
FFTREAT_REU_TRANS(M,A,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE TRATAMIENTO A REUSO TRANSICION
FFTREAT_REU_PROD(P,E,T)	FLUJO DE CORRIENTES DE TRATAMIENTO A REUSO PRODUCIDA
FREU_FLOWBACK(B,T)	FLUJO ALIMENTADO A REUSO FLOWBACK
FREU_TRANS(A,T)	FLUJO ALIMENTADO A REUSO TRANSICION
FREU_PROD(E,T)	FLUJO ALIMENTADO A REUSO PRODUCIDA

FSTO_IN_FLOWBACK(C,T)	FLUJO ALIMENTADO A ALMACENADOR FLOWBACK	
FSTO_IN_TRANS(D,T)	FLUJO ALIMENTADO A ALMACENADOR TRANSICION	
FSTO_IN_PROD(G,T)	FLUJO ALIMENTADO A ALMACENADOR PRODUCIDA	
FSTO_OUT_FLOWBACK(C,T)	FLUJO DE SALIDA DE ALMACENADOR FLOWBACK	
FSTO_OUT_TRANS(D,T)	FLUJO DE SALIDA DE ALMACENADOR TRANSICION	
FSTO_OUT_PROD(G,T)	FLUJO DE SALIDA DE ALMACENADOR PRODUCIDA	
VSTO_FLOWBACK(C,T)	ACUMULACION EN EL ALMACENADOR FLOWBACK	
VSTO_TRANS(D,T)	ACUMULACION EN EL ALMACENADOR TRANSICION	
VSTO_PROD(G,T)	ACUMULACION EN EL ALMACENADOR PRODUCIDA	
***		
FTREAT_CAP_FLOWBACK(F)	CAPACIDAD DE TRATAMIENTO FLOWBACK	
FTREAT_CAP_TRANS(M)	CAPACIDAD DE TRATAMIENTO TRANSICION	
FTREAT_CAP_PROD(P)	CAPACIDAD DE TRATAMIENTO PRODUCIDA	
VSTO_CAP_FLOWBACK(C)	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK	
VSTO_CAP_TRANS(D)	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO TRANSICION	
VSTO_CAP_PROD(G)	CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO PRODUCIDA	
*COSTOS		
COSTFRESH	COSTO DE LA CORRIENTE FRESCA	
COSTOP_TREAT_FLOWBACK	COSTO OPERACIONAL DE TRATAMIENTO FLOWBACK	
COSTOP_TREAT_TRANS	COSTO OPERACIONAL DE TRATAMIENTO TRANSICION	
COSTOP_TREAT_PROD	COSTO OPERACIONAL DE TRATAMIENTO PRODUCIDA	
***		
*COSTOS DE TRANSPORTE		
COSTTRANS_FRESH	COSTO DE TRANSPORTE DE AGUA FRESCA	
COSTTRANS_FLOWBACK	COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO FLOWBACK	
COSTTRANS_TRANS	COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO TRANSICION	
COSTTRANS_PROD	COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO PRODUCIDA	
COSTTRANS_TREAT_REU_FLOWBACK	COSTO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO FLOWBACK	
COSTTRANS_TREAT_REU_TRANS	COSTO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO TRANSICION	
COSTTRANS_TREAT_REU_PROD	COSTO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO PRODUCIDA	
COSTTRANS_WELL_STO_FLOWBACK	COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENADOR FLOWBACK	
COSTTRANS_WELL_STO_TRANS	COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENADOR TRANSICION	
COSTTRANS_WELL_STO_PROD	COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENADOR PRODUCIDA	
***		
COSTTRANS_STO_WELL_FLOWBACK	COSTO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR A WELL FLOWBACK	
COSTTRANS_STO_WELL_TRANS	COSTO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR A WELL TRANSICION	
COSTTRANS_STO_WELL_PROD	COSTO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR A WELL PRODUCIDA	
TOC	COSTO OPERATIVO TOTAL	
CAPCOST_TREAT_FLOWBACK	COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE TRATAMIENTO FLOWBACK	
CAPCOST_TREAT_TRANS	COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE TRATAMIENTO TRANSICION	
CAPCOST_TREAT_PROD	COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE TRATAMIENTO PRODUCIDA	
CAPCOST_STORAGE_FLOWBACK	COSTO DE CAPITAL DE UNIDADESS DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK	
CAPCOST_STORAGE_TRANS	COSTO DE CAPITAL DE UNIDADESS DE ALMACENAMIENTO TRANSICION	
***		
CAPCOSTSTORAGE_PROD	COSTO DE CAPITAL DE UNIDADESS DE ALMACENAMIENTO PRODDUCIDA	
TCC	COSTO TOTAL DE CAPITAL	
TVC	VENTA TOTAL DE AGUA DE REUSO	
;		
VARIABLES		
TAC	COSTO ANUAL TOTAL	
TWR	AGUA TOTAL NECESARIA	
;		
PARAMETROS		
PARAMETER AVAILVFRESH_MAX(T)	DISPONIBILIDAD DE AGUA	AVAILVFRESH_MAX(T)=1E5;
PARAMETER HTIME	FACTOR DE CONVERSION;	HTIME=7;
PARAMETER FWELL_IN(N,T)	FLUJO ALIMENTADO A WELL;	
PARAMETER FWELL_OUT_FLOWBACK(N,T)	FLUJO DE SALIDA DE WELL FLOWBACK;	
PARAMETER FWELL_OUT_TRANS(N,T)	FLUJO DE SALIDA DE WELL TRANSICION;	
PARAMETER FWELL_OUT_PROD(N,T)	FLUJO DE SALIDA DE WELL FLOWBACK;	
***		
PARAMETER ALPHATREAT_FLOWBACK(F)	EFICIENCIA VOLUMETRICA DEL TRATAMIETO FLOWBACK;	
ALPHATREAT_FLOWBACK('1')=0.94;	ALPHATREAT_FLOWBACK('2')=0.88;	
PARAMETER ALPHATREAT_TRANS(M)	EFICIENCIA VOLUMETRICA DEL TRATAMIETO TRANSICION;	
ALPHATREAT_TRANS('1')=0.8;	ALPHATREAT_TRANS('2')=0.72;	
PARAMETER ALPHATREAT_PROD(P)	EFICIENCIA VOLUMETRICA DEL TRATAMIETO PRODUCIDA;	
ALPHATREAT_PROD('1')=0.6;	ALPHATREAT_PROD('2')=0.52;	
PARAMETER VSTO_INITIAL_FLOWBACK(C)	VOLUMEN INICIAL DE ALMACENADOR FLOWBACK;	
VSTO_INITIAL_FLOWBACK(C)=0;		

PARAMETER VSTO\_INITIAL\_TRANS(D) VOLUMEN INICIAL DE ALMACENADOR TRANSICION;  
VSTO\_INITIAL\_TRANS(D)=0;  
PARAMETER VSTO\_INITIAL\_PROD(G) VOLUMEN INICIAL DE ALMACENADOR PRODUCIDA ;  
VSTO\_INITIAL\_PROD(G)=0;  
\*\*\*  
PARAMETER FTREAT\_MAX\_FLOWBACK(F) FLUJO MAXIMO DE TRATAMIENTO FLOWBACK;  
FTREAT\_MAX\_FLOWBACK(F)=500;  
PARAMETER FTREAT\_MAX\_TRANS(M) FLUJO MAXIMO DE TRATAMIENTO TRANSICION;  
FTREAT\_MAX\_TRANS(M)=400;  
PARAMETER FTREAT\_MAX\_PROD(P) FLUJO MAXIMO DE TRATAMIENTO PRODUCIDA;  
FTREAT\_MAX\_PROD(P)=300;  
PARAMETER VSTO\_MAX\_FLOWBACK(C) ALMACENAMIENTO MAXIMO FLOWBACK;  
VSTO\_MAX\_FLOWBACK(C)=12000;  
PARAMETER VSTO\_MAX\_TRANS(D) ALMACENAMIENTO MAXIMO TRANSICION;  
VSTO\_MAX\_TRANS(D)=10000;  
PARAMETER VSTO\_MAX\_PROD(G) ALMACENAMIENTO MAXIMO PRODUCIDA;  
VSTO\_MAX\_PROD(G)=8000;  
\*COSTOS  
PARAMETER UCFRESH COSTO UNITARIO DE AGUA FRESCA; UCFRESH=2;  
PARAMETER UOCTREAT\_FLOWBACK(F) COSTO UNITARIO OPERACIONAL DE TRATAMIENTO FLOWBACK;  
UOCTREAT\_FLOWBACK('1')=12; UOCTREAT\_FLOWBACK('2')=10.3;  
PARAMETER UOCTREAT\_TRANS(M) COSTO UNITARIO OPERACIONAL DE TRATAMIENTO TRANSICION;  
UOCTREAT\_TRANS('1')=17.5; UOCTREAT\_TRANS('2')=14;  
PARAMETER UOCTREAT\_PROD(P) COSTO UNITARIO OPERACIONAL DE TRATAMIENTO PRODUCIDA;  
UOCTREAT\_PROD('1')=26.7; UOCTREAT\_PROD('2')=23;  
\*\*\*  
\*COSTOS UNITARIOS DE TRANSPORTE  
PARAMETER UTCFRESH(N) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE AGUA FRESCA A LOS WELLS;  
UTCRESH(N1)=4; UTCRESH(N2)=7; UTCRESH(N3)=12;  
PARAMETER UTCUSED\_FLOWBACK(N,F) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO FLOWBACK;  
UTCUSED\_FLOWBACK(N1,F)=0.39; UTCUSED\_FLOWBACK(N1,F)=0.72; UTCUSED\_FLOWBACK(N1,F)=0.94;  
PARAMETER UTCUSED\_TRANS(N,M) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO TRANSICION;  
UTCUSED\_TRANS(N1,M)=0.39; UTCUSED\_TRANS(N1,M)=0.72; UTCUSED\_TRANS(N1,M)=0.94;  
PARAMETER UTCUSED\_PROD(N,P) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO PRODUCIDA;  
UTCUSED\_PROD(N1,P)=0.39; UTCUSED\_PROD(N1,P)=0.72; UTCUSED\_PROD(N1,P)=0.94;  
PARAMETER UTCTREAT\_REU\_FLOWBACK(F,B) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO  
FLOWBACK; UTCTREAT\_REU\_FLOWBACK(F,B)=8.3;  
PARAMETER UTCTREAT\_REU\_TRANS(M,A) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO  
TRANSICION; UTCTREAT\_REU\_TRANS(M,A)=8.3;  
PARAMETER UTCTREAT\_REU\_PROD(P,E) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO  
PRODUCIDA; UTCTREAT\_REU\_PROD(P,E)=8.3;  
PARAMETER UTCWELL\_STO\_FLOWBACK(N,C) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENADOR  
FLOWBACK; UTCWELL\_STO\_FLOWBACK(N1,C)=5; UTCWELL\_STO\_FLOWBACK(N2,C)=5;  
UTCWELL\_STO\_FLOWBACK(N3,C)=5;  
PARAMETER UTCWELL\_STO\_TRANS(N,D) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENADOR  
TRANSICION; UTCWELL\_STO\_TRANS(N1,D)=5; UTCWELL\_STO\_TRANS(N2,D)=5; UTCWELL\_STO\_TRANS(N3,D)=5;  
PARAMETER UTCWELL\_STO\_PROD(N,G) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENADOR  
PRODUCIDA; UTCWELL\_STO\_PROD(N1,G)=5; UTCWELL\_STO\_PROD(N2,G)=5; UTCWELL\_STO\_PROD(N3,G)=5;  
\*\*\*  
PARAMETER UTCSTO\_WELL\_FLOWBACK(C,N) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR FLOWBACK A  
WELL; UTCSTO\_WELL\_FLOWBACK(C,N1)=0.98; UTCSTO\_WELL\_FLOWBACK(C,N2)=1.23;  
UTCSTO\_WELL\_FLOWBACK(C,N3)=1.65;  
PARAMETER UTCSTO\_WELL\_TRANS(D,N) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR TRANSICION A  
WELL; UTCSTO\_WELL\_TRANS(D,N1)=0.98; UTCSTO\_WELL\_TRANS(D,N2)=1.23; UTCSTO\_WELL\_TRANS(D,N3)=1.65;  
PARAMETER UTCSTO\_WELL\_PROD(G,N) COSTO UNITARIO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR PRODUCIDA A  
WELL; UTCSTO\_WELL\_PROD(G,N1)=0.98; UTCSTO\_WELL\_PROD(G,N2)=1.23; UTCSTO\_WELL\_PROD(G,N3)=1.65;  
PARAMETER KFFB FACTOR PARA ANUALIZAR LA INVERSION DE TRAT Y ALMAC FLOWBACK;  
KFFB=0.1;  
PARAMETER FCTREAT\_FLOWBACK COSTO FIJO DE CAPITAL DEL TRATAMIENTO FLOWBACK;  
FCTREAT\_FLOWBACK=95000;  
PARAMETER VCTREAT\_FLOWBACK COSTO VARIABLE DE CAPITAL DEL TRATAMIENTO FLOWBACK;  
VCTREAT\_FLOWBACK=4.1;  
PARAMETER KFTRANS FACTOR PARA ANUALIZAR LA INVERSION DE TRAT Y ALMAC TRANSICION;  
KFTRANS=0.1;  
PARAMETER FCTREAT\_TRANS COSTO FIJO DE CAPITAL DEL TRATAMIENTO TRANSICION;  
FCTREAT\_TRANS=96000;  
PARAMETER VCTREAT\_TRANS COSTO VARIABLE DE CAPITAL DEL TRATAMIENTO TRANSICION;  
VCTREAT\_TRANS=4.2;  
PARAMETER KFPROD FACTOR PARA ANUALIZAR LA INVERSION DE TRAT Y ALMAC PRODUCCIDA;  
KFPROD=0.1;

PARAMETER FCTREAT\_PROD COSTO FIJO DE CAPITAL DEL TRATAMIENTO PRODUCIDA;  
 FCTREAT\_PROD=98000;  
 PARAMETER VCTREAT\_PROD COSTO VARIABLE DE CAPITAL DEL TRATAMIENTO PRODUCIDA;  
 VCTREAT\_PROD=4.3;  
 PARAMETER FCSTORAGE\_FLOWBACK COSTO FIJO DE CAPITAL DEL ALMACENADOR FLOWBACK;  
 FCSTORAGE\_FLOWBACK=10000;  
 PARAMETER VCSTORAGE\_FLOWBACK COSTO VARIABLE DE CAPITAL DEL ALMACENADOR FLOWBACK;  
 VCSTORAGE\_FLOWBACK=6.3;  
 PARAMETER FCSTORAGE\_TRANS COSTO FIJO DE CAPITAL DEL ALMACENADOR TRANSICION;  
 FCSTORAGE\_TRANS=9000;  
 PARAMETER VCSTORAGE\_TRANS COSTO VARIABLE DE CAPITAL DEL ALMACENADOR TRANSICION;  
 VCSTORAGE\_TRANS=6.2;  
 \*\*\*  
 PARAMETER FCSTORAGE\_PROD COSTO FIJO DE CAPITAL DEL ALMACENADOR PRODUCIDA;  
 FCSTORAGE\_PROD=8000;  
 PARAMETER VCSTORAGE\_PROD COSTO VARIABLE DE CAPITAL DEL ALMACENADOR PRODUCIDA;  
 VCSTORAGE\_PROD=6.1;  
 PARAMETER UVCREU\_FLOWBACK(B) COSTO UNITARIO DE VENTA DE AGUA AL REUSO FLOWBACK;  
 UVCREU\_FLOWBACK(B)=1;  
 PARAMETER UVCREU\_TRANS(A) COSTO UNITARIO DE VENTA DE AGUA AL REUSO TRANSICION;  
 UVCREU\_TRANS(A)=0.8;  
 PARAMETER UVCREU\_PROD(E) COSTO UNITARIO DE VENTA DE AGUA AL REUSO PRODUCIDA;  
 UVCREU\_PROD(E)=0.6;

PARAMETER FWELL\_REQ AGUA REQUERIDA POR WELL; FWELL\_REQ=428.57;  
 FWELL\_IN('1',T)\$ (ORD(T) GE 1 AND ORD(T) LE 5)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('2',T)\$ (ORD(T) GE 7 AND ORD(T) LE 11)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('3',T)\$ (ORD(T) GE 13 AND ORD(T) LE 17)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('4',T)\$ (ORD(T) GE 19 AND ORD(T) LE 23)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('5',T)\$ (ORD(T) GE 27 AND ORD(T) LE 31)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('6',T)\$ (ORD(T) GE 33 AND ORD(T) LE 37)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('7',T)\$ (ORD(T) GE 39 AND ORD(T) LE 43)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('8',T)\$ (ORD(T) GE 45 AND ORD(T) LE 49)=FWELL\_REQ;  
 \*  
 FWELL\_IN('9',T)\$ (ORD(T) GE 1 AND ORD(T) LE 5)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('10',T)\$ (ORD(T) GE 7 AND ORD(T) LE 11)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('11',T)\$ (ORD(T) GE 13 AND ORD(T) LE 17)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('12',T)\$ (ORD(T) GE 19 AND ORD(T) LE 23)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('13',T)\$ (ORD(T) GE 32 AND ORD(T) LE 36)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('14',T)\$ (ORD(T) GE 38 AND ORD(T) LE 42)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('15',T)\$ (ORD(T) GE 44 AND ORD(T) LE 48)=FWELL\_REQ;  
 \*  
 FWELL\_IN('16',T)\$ (ORD(T) GE 5 AND ORD(T) LE 9)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('17',T)\$ (ORD(T) GE 11 AND ORD(T) LE 15)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('18',T)\$ (ORD(T) GE 17 AND ORD(T) LE 21)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('19',T)\$ (ORD(T) GE 36 AND ORD(T) LE 40)=FWELL\_REQ;  
 FWELL\_IN('20',T)\$ (ORD(T) GE 42 AND ORD(T) LE 46)=FWELL\_REQ;

PARAMETER TFLOWBACK(FT) PORCENTAJE QUE RETORNA RESPECTO AL TOTAL FLOWBACK;  
 PARAMETER TTRANS(TT) PORCENTAJE QUE RETORNA RESPECTO AL TOTAL TRANSICION;  
 PARAMETER TPROD(PT) PORCENTAJE QUE RETORNA RESPECTO AL TOTAL RPRODUCIDA ;

\*FLOWBACK (1-3 semanas)

TFLOWBACK('1')=273.51; TFLOWBACK('2')=140; TFLOWBACK('3')=27.7;

\*TRANSICION (4-15 semanas)

TTRANS('1')=26.4; TTRANS('2')=23.5; TTRANS('3')=20.9; TTRANS('4')=15.8;

FWELL\_OUT\_TRANS('1',T)\$ (ORD(T) GE 9 AND ORD(T) LE 11)=TTRANS('1');  
 FWELL\_OUT\_TRANS('1',T)\$ (ORD(T) GE 12 AND ORD(T) LE 14)=TTRANS('2');  
 FWELL\_OUT\_TRANS('1',T)\$ (ORD(T) GE 15 AND ORD(T) LE 17)=TTRANS('3');  
 FWELL\_OUT\_TRANS('1',T)\$ (ORD(T) GE 18 AND ORD(T) LE 20)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('2',T)\$ (ORD(T) GE 15 AND ORD(T) LE 17)=TTRANS('1');  
 FWELL\_OUT\_TRANS('2',T)\$ (ORD(T) GE 18 AND ORD(T) LE 20)=TTRANS('2');  
 FWELL\_OUT\_TRANS('2',T)\$ (ORD(T) GE 21 AND ORD(T) LE 23)=TTRANS('3');

FWELL\_OUT\_TRANS('2,T)\$(ORD(T) GE 24 AND ORD(T) LE 26)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('3,T)\$(ORD(T) GE 21 AND ORD(T) LE 23)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('3,T)\$(ORD(T) GE 24 AND ORD(T) LE 26)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('3,T)\$(ORD(T) GE 27 AND ORD(T) LE 29)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('3,T)\$(ORD(T) GE 30 AND ORD(T) LE 32)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('4,T)\$(ORD(T) GE 27 AND ORD(T) LE 29)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('4,T)\$(ORD(T) GE 30 AND ORD(T) LE 32)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('4,T)\$(ORD(T) GE 33 AND ORD(T) LE 35)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('4,T)\$(ORD(T) GE 36 AND ORD(T) LE 38)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('5,T)\$(ORD(T) GE 35 AND ORD(T) LE 37)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('5,T)\$(ORD(T) GE 38 AND ORD(T) LE 40)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('5,T)\$(ORD(T) GE 41 AND ORD(T) LE 43)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('5,T)\$(ORD(T) GE 44 AND ORD(T) LE 46)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('6,T)\$(ORD(T) GE 41 AND ORD(T) LE 43)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('6,T)\$(ORD(T) GE 44 AND ORD(T) LE 46)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('6,T)\$(ORD(T) GE 47 AND ORD(T) LE 49)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('6,T)\$(ORD(T) GE 50 AND ORD(T) LE 52)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('7,T)\$(ORD(T) GE 47 AND ORD(T) LE 49)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('7,T)\$(ORD(T) GE 50 AND ORD(T) LE 52)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('7,T)\$(ORD(T) GE 53 AND ORD(T) LE 55)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('7,T)\$(ORD(T) GE 56 AND ORD(T) LE 58)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('8,T)\$(ORD(T) GE 53 AND ORD(T) LE 55)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('8,T)\$(ORD(T) GE 56 AND ORD(T) LE 58)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('8,T)\$(ORD(T) GE 59 AND ORD(T) LE 61)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('8,T)\$(ORD(T) GE 62 AND ORD(T) LE 64)=TTRANS('4');

\*

FWELL\_OUT\_TRANS('9,T)\$(ORD(T) GE 9 AND ORD(T) LE 11)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('9,T)\$(ORD(T) GE 12 AND ORD(T) LE 14)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('9,T)\$(ORD(T) GE 15 AND ORD(T) LE 17)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('9,T)\$(ORD(T) GE 18 AND ORD(T) LE 20)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('10,T)\$(ORD(T) GE 15 AND ORD(T) LE 17)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('10,T)\$(ORD(T) GE 18 AND ORD(T) LE 20)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('10,T)\$(ORD(T) GE 21 AND ORD(T) LE 23)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('10,T)\$(ORD(T) GE 24 AND ORD(T) LE 26)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('11,T)\$(ORD(T) GE 21 AND ORD(T) LE 23)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('11,T)\$(ORD(T) GE 24 AND ORD(T) LE 26)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('11,T)\$(ORD(T) GE 27 AND ORD(T) LE 29)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('11,T)\$(ORD(T) GE 30 AND ORD(T) LE 32)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('12,T)\$(ORD(T) GE 27 AND ORD(T) LE 29)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('12,T)\$(ORD(T) GE 30 AND ORD(T) LE 32)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('12,T)\$(ORD(T) GE 33 AND ORD(T) LE 35)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('12,T)\$(ORD(T) GE 36 AND ORD(T) LE 38)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('13,T)\$(ORD(T) GE 40 AND ORD(T) LE 42)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('13,T)\$(ORD(T) GE 43 AND ORD(T) LE 45)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('13,T)\$(ORD(T) GE 46 AND ORD(T) LE 48)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('13,T)\$(ORD(T) GE 49 AND ORD(T) LE 51)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('14,T)\$(ORD(T) GE 46 AND ORD(T) LE 48)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('14,T)\$(ORD(T) GE 49 AND ORD(T) LE 51)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('14,T)\$(ORD(T) GE 52 AND ORD(T) LE 54)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('14,T)\$(ORD(T) GE 55 AND ORD(T) LE 57)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('15,T)\$(ORD(T) GE 52 AND ORD(T) LE 54)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('15,T)\$(ORD(T) GE 55 AND ORD(T) LE 57)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('15,T)\$(ORD(T) GE 58 AND ORD(T) LE 60)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('15,T)\$(ORD(T) GE 61 AND ORD(T) LE 63)=TTRANS('4');

\*

FWELL\_OUT\_TRANS('16,T)\$(ORD(T) GE 13 AND ORD(T) LE 15)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('16,T)\$(ORD(T) GE 16 AND ORD(T) LE 18)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('16,T)\$(ORD(T) GE 19 AND ORD(T) LE 21)=TTRANS('3');

FWELL\_OUT\_TRANS('16',T)\$(ORD(T) GE 22 AND ORD(T) LE 24)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('17',T)\$(ORD(T) GE 19 AND ORD(T) LE 21)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('17',T)\$(ORD(T) GE 22 AND ORD(T) LE 24)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('17',T)\$(ORD(T) GE 25 AND ORD(T) LE 27)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('17',T)\$(ORD(T) GE 28 AND ORD(T) LE 30)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('18',T)\$(ORD(T) GE 25 AND ORD(T) LE 27)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('18',T)\$(ORD(T) GE 28 AND ORD(T) LE 30)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('18',T)\$(ORD(T) GE 31 AND ORD(T) LE 33)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('18',T)\$(ORD(T) GE 34 AND ORD(T) LE 36)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('19',T)\$(ORD(T) GE 44 AND ORD(T) LE 46)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('19',T)\$(ORD(T) GE 47 AND ORD(T) LE 49)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('19',T)\$(ORD(T) GE 50 AND ORD(T) LE 52)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('19',T)\$(ORD(T) GE 53 AND ORD(T) LE 55)=TTRANS('4');

FWELL\_OUT\_TRANS('20',T)\$(ORD(T) GE 50 AND ORD(T) LE 52)=TTRANS('1');  
FWELL\_OUT\_TRANS('20',T)\$(ORD(T) GE 53 AND ORD(T) LE 55)=TTRANS('2');  
FWELL\_OUT\_TRANS('20',T)\$(ORD(T) GE 56 AND ORD(T) LE 58)=TTRANS('3');  
FWELL\_OUT\_TRANS('20',T)\$(ORD(T) GE 59 AND ORD(T) LE 61)=TTRANS('4');

\*PRODUCIDA (16-32 semanas)

TPROD('1')=13.2; TPROD('2')=9.1; TPROD('3')=4.9; TPROD('4')=2.5;

FWELL\_OUT\_PROD('1',T)\$(ORD(T) GE 21 AND ORD(T) LE 25)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('1',T)\$(ORD(T) GE 26 AND ORD(T) LE 30)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('1',T)\$(ORD(T) GE 31 AND ORD(T) LE 35)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('1',T)\$(ORD(T) GE 36 AND ORD(T) LE 37)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('2',T)\$(ORD(T) GE 27 AND ORD(T) LE 31)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('2',T)\$(ORD(T) GE 32 AND ORD(T) LE 36)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('2',T)\$(ORD(T) GE 37 AND ORD(T) LE 41)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('2',T)\$(ORD(T) GE 42 AND ORD(T) LE 43)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('3',T)\$(ORD(T) GE 33 AND ORD(T) LE 37)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('3',T)\$(ORD(T) GE 38 AND ORD(T) LE 42)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('3',T)\$(ORD(T) GE 43 AND ORD(T) LE 47)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('3',T)\$(ORD(T) GE 48 AND ORD(T) LE 49)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('4',T)\$(ORD(T) GE 39 AND ORD(T) LE 43)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('4',T)\$(ORD(T) GE 44 AND ORD(T) LE 48)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('4',T)\$(ORD(T) GE 49 AND ORD(T) LE 53)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('4',T)\$(ORD(T) GE 54 AND ORD(T) LE 55)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('5',T)\$(ORD(T) GE 47 AND ORD(T) LE 51)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('5',T)\$(ORD(T) GE 52 AND ORD(T) LE 56)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('5',T)\$(ORD(T) GE 57 AND ORD(T) LE 61)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('5',T)\$(ORD(T) GE 62 AND ORD(T) LE 63)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('6',T)\$(ORD(T) GE 53 AND ORD(T) LE 57)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('6',T)\$(ORD(T) GE 58 AND ORD(T) LE 62)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('6',T)\$(ORD(T) GE 63 AND ORD(T) LE 67)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('6',T)\$(ORD(T) GE 68 AND ORD(T) LE 69)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('7',T)\$(ORD(T) GE 59 AND ORD(T) LE 63)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('7',T)\$(ORD(T) GE 64 AND ORD(T) LE 68)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('7',T)\$(ORD(T) GE 69 AND ORD(T) LE 73)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('7',T)\$(ORD(T) GE 74 AND ORD(T) LE 75)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('8',T)\$(ORD(T) GE 65 AND ORD(T) LE 69)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('8',T)\$(ORD(T) GE 70 AND ORD(T) LE 74)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('8',T)\$(ORD(T) GE 75 AND ORD(T) LE 79)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('8',T)\$(ORD(T) GE 80 AND ORD(T) LE 81)=TPROD('4');

\*

FWELL\_OUT\_PROD('9',T)\$(ORD(T) GE 21 AND ORD(T) LE 25)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('9',T)\$(ORD(T) GE 26 AND ORD(T) LE 30)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('9',T)\$(ORD(T) GE 31 AND ORD(T) LE 35)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('9',T)\$(ORD(T) GE 36 AND ORD(T) LE 37)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('10',T)\$ (ORD(T) GE 27 AND ORD(T) LE 31)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('10',T)\$ (ORD(T) GE 32 AND ORD(T) LE 36)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('10',T)\$ (ORD(T) GE 37 AND ORD(T) LE 41)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('10',T)\$ (ORD(T) GE 42 AND ORD(T) LE 43)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('11',T)\$ (ORD(T) GE 33 AND ORD(T) LE 37)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('11',T)\$ (ORD(T) GE 38 AND ORD(T) LE 42)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('11',T)\$ (ORD(T) GE 43 AND ORD(T) LE 47)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('11',T)\$ (ORD(T) GE 48 AND ORD(T) LE 49)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('12',T)\$ (ORD(T) GE 39 AND ORD(T) LE 43)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('12',T)\$ (ORD(T) GE 44 AND ORD(T) LE 48)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('12',T)\$ (ORD(T) GE 49 AND ORD(T) LE 53)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('12',T)\$ (ORD(T) GE 54 AND ORD(T) LE 55)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('13',T)\$ (ORD(T) GE 52 AND ORD(T) LE 56)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('13',T)\$ (ORD(T) GE 57 AND ORD(T) LE 61)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('13',T)\$ (ORD(T) GE 62 AND ORD(T) LE 66)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('13',T)\$ (ORD(T) GE 67 AND ORD(T) LE 68)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('14',T)\$ (ORD(T) GE 58 AND ORD(T) LE 62)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('14',T)\$ (ORD(T) GE 63 AND ORD(T) LE 67)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('14',T)\$ (ORD(T) GE 68 AND ORD(T) LE 72)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('14',T)\$ (ORD(T) GE 73 AND ORD(T) LE 74)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('15',T)\$ (ORD(T) GE 64 AND ORD(T) LE 68)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('15',T)\$ (ORD(T) GE 69 AND ORD(T) LE 73)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('15',T)\$ (ORD(T) GE 74 AND ORD(T) LE 78)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('15',T)\$ (ORD(T) GE 79 AND ORD(T) LE 80)=TPROD('4');

\*  
FWELL\_OUT\_PROD('16',T)\$ (ORD(T) GE 25 AND ORD(T) LE 29)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('16',T)\$ (ORD(T) GE 30 AND ORD(T) LE 34)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('16',T)\$ (ORD(T) GE 35 AND ORD(T) LE 39)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('16',T)\$ (ORD(T) GE 40 AND ORD(T) LE 41)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('17',T)\$ (ORD(T) GE 31 AND ORD(T) LE 35)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('17',T)\$ (ORD(T) GE 36 AND ORD(T) LE 40)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('17',T)\$ (ORD(T) GE 41 AND ORD(T) LE 45)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('17',T)\$ (ORD(T) GE 46 AND ORD(T) LE 47)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('18',T)\$ (ORD(T) GE 37 AND ORD(T) LE 41)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('18',T)\$ (ORD(T) GE 42 AND ORD(T) LE 46)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('18',T)\$ (ORD(T) GE 47 AND ORD(T) LE 51)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('18',T)\$ (ORD(T) GE 52 AND ORD(T) LE 53)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('19',T)\$ (ORD(T) GE 56 AND ORD(T) LE 60)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('19',T)\$ (ORD(T) GE 61 AND ORD(T) LE 65)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('19',T)\$ (ORD(T) GE 66 AND ORD(T) LE 70)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('19',T)\$ (ORD(T) GE 71 AND ORD(T) LE 72)=TPROD('4');

FWELL\_OUT\_PROD('20',T)\$ (ORD(T) GE 62 AND ORD(T) LE 66)=TPROD('1');  
FWELL\_OUT\_PROD('20',T)\$ (ORD(T) GE 67 AND ORD(T) LE 71)=TPROD('2');  
FWELL\_OUT\_PROD('20',T)\$ (ORD(T) GE 72 AND ORD(T) LE 76)=TPROD('3');  
FWELL\_OUT\_PROD('20',T)\$ (ORD(T) GE 77 AND ORD(T) LE 78)=TPROD('4');

DISPLAY FWELL\_IN,FWELL\_OUT\_FLOWBACK,FWELL\_OUT\_TRANS,FWELL\_OUT\_PROD;

#### EQUATIONS

EQ1(T) LIMITACION DE DISPONIBILIDAD DE AGUA FRESCA,  
EQ2(T) BALANCE DE AGUA FRESCA,  
EQ3(N,T) SUMINISTRO DE AGUA A WELLS,  
\*EQ4(N,T) AGUA FLOWBACK DE SALIDA DE LOS WELLS EN RELACION A LA ENTRADA,  
\*EQ5(N,T) AGUA TRANSICION DE SALIDA DE LOS WELLS EN RELACION A LA ENTRADA,  
\*EQ6(N,T) AGUA PRODUCIDA DE SALIDA DE LOS WELLS EN RELACION A LA ENTRADA,  
EQ7(N,T) AGUA FLOWBACK DE SALIDA DE WELLS,  
EQ8(N,T) AGUA TRANSICION DE SALIDA DE WELLS,  
EQ9(N,T) AGUA PRODUCIDA DE SALIDA DE WELLS,  
EQ10(F,T) AGUA DE ENTRADA A UNIDADES DE TRATAMIENTO FLOWBACK,  
EQ11(M,T) AGUA DE ENTRADA A UNIDADES DE TRATAMIENTO TRANSICION,

EQ12(P,T) AGUA DE ENTRADA A UNIDADES DE TRATAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ13(F,T) AGUA DE SALIDA A UNIDADES DE TRATAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ14(M,T)AGUA DE SALIDA A UNIDADES DE TRATAMIENTO TRANSICION,  
 EQ15(P,T) AGUA DE SALIDA A UNIDADES DE TRATAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ16(B,T) BALANCE EN UNIDADES DE REUSO FLOWBACK,  
 EQ17(A,T) BALANCE EN UNIDADES DE REUSO TRANSICION,  
 EQ18(E,T) BALANCE EN UNIDADES DE REUSO PRODUCIDA,  
 EQ19(C,T) AGUA DE ENTRADA A UNIDADES DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ20(D,T) AGUA DE ENTRADA A UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION,  
 EQ21(G,T) AGUA DE ENTRADA A UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION,  
 EQ22(C,T) AGUA DE SALIDA DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ23(D,T) AGUA DE SALIDA DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION,  
 EQ24(G,T) AGUA DE SALIDA DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ25(F,T) BALANCE EN UNIDADES DE TRATAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ26(M,T) BALANCE EN UNIDADES DE TRATAMIENTO TRANSICION,  
 EQ27(P,T) BALANCE EN UNIDADES DE TRATAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ28(C,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK RESTRICCION =1,  
 EQ29(C,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK RESTRICCION >1,  
 EQ30(C,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK RESTRICCION TFINAL,  
 EQ31(D,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION RESTRICCION =1,  
 EQ32(D,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION RESTRICCION >1,  
 EQ33(D,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION RESTRICCION TFINAL,  
 EQ34(G,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO PRODUCIDA RESTRICCION =1,  
 EQ35(G,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO RPRODUCIDA RESTRICCION >1,  
 EQ36(G,T) VOLUMEN EN UNIDADES DE ALMACENAMIENTO PRODUCIDA RESTRICCION TFINAL,  
 EQ37(F,T) DISEÑO Y CAPACIDAD DE UNIDADES DE TRATAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ38(F) DISEÑO Y EXISTENCIA DE UNIDADES DE TRATAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ39(M,T) DISEÑO Y CAPACIDAD DE UNIDADES DE TRATAMIENTO TRANSICION,  
 EQ40(M) DISEÑO Y EXISTENCIA DE UNIDADES DE TRATAMIENTO TRANSICION,  
 EQ41(P,T) DISEÑO Y CAPACIDAD DE UNIDADES DE TRATAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ42(P) DISEÑO Y EXISTENCIA DE UNIDADES DE TRATAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ43(C,T) DISEÑO Y CAPACIDAD DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ44(C) DISEÑO Y EXISTENCIA DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ45(D,T) DISEÑO Y CAPACIDAD DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION,  
 EQ46(D) DISEÑO Y EXISTENCIA DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION,  
 EQ47(G,T) DISEÑO Y CAPACIDAD DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ48(G) DISEÑO Y EXISTENCIA DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ49 AGUA TOTAL NECESARIA,  
 EQ50 COSTO DE AGUA FRESCA,  
 EQ51 COSTO OPERACIONAL DE TRATADORES FLOWBACK,  
 EQ52 COSTO OPERACIONAL DE TRATADORES TRANSICION,  
 EQ53 COSTO OPERACIONAL DE TRATADORES PRODUCIDA,  
 EQ54 COSTO DE TRANSPORTE DE AGUA FRESCA,  
 EQ55 COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ56 COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO TRANSICION,  
 EQ57 COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A TRATAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ58 COSTO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO FLOWBACK,  
 EQ59 COSTO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO TRANSICION,  
 EQ60 COSTO DE TRANSPORTE DE TRATAMIENTO A REUSO PRODUCIDA,  
 EQ61 COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ62 COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENAMIENTO TRANSICION,  
 EQ63 COSTO DE TRANSPORTE DE WELL A ALMACENAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ64 COSTO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR A WELL FLOWBACK,  
 EQ65 COSTO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR A WELL TRANSICION,  
 EQ66 COSTO DE TRANSPORTE DE ALMACENADOR A WELL PRODUCIDA,  
 EQ67 COSTO OPERATIVO TOTAL,  
 EQ68 COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE TRATAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ69 COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE TRATAMIENTO TRANSICION,  
 EQ70 COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE TRATAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ71 COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO FLOWBACK,  
 EQ72 COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO TRANSICION,  
 EQ73 COSTO DE CAPITAL DE UNIDADES DE ALMACENAMIENTO PRODUCIDA,  
 EQ74 COSTO TOTAL DE CAPITAL,  
 EQ75 VENTA TOTAL DE AGUA DE REUSO,  
 EQ76 COSTO ANUAL TOTAL;

EQ1(T).. FFRESH(T)=L=AVAILVFRESH\_MAX(T)/HTIME;  
 EQ2(T).. FFRESH(T)=E=SUM(N,FFRESH(N,T));

EQ3(N,T)..  
 FWELL\_IN(N,T)=E=FFFRESH(N,T)+SUM(C,FFSTORAGE\_FLOWBACK(C,N,T))+SUM(D,FFSTORAGE\_TRANS(D,N,T))+SUM(G,FFSTORAGE\_PROD(G,N,T));  
 \*EQ4(N,T).. FWELL\_OUT\_FLOWBACK(N,T)=E=BETTAFLOWBACK(N,TR)\*FWELL\_IN(N,T);  
 \*EQ5(N,T).. FWELL\_OUT\_TRANS(N,T)=E=BETTATRANS(N,TR)\*FWELL\_IN(N,T);  
 \*EQ6(N,T).. FWELL\_OUT\_PROD(N,T)=E=BETTAPROD(N,TR)\*FWELL\_IN(N,T);  
 EQ7(N,T)..  
 FWELL\_OUT\_FLOWBACK(N,T)=E=SUM(F,FFWELL\_TREAT\_FLOWBACK(N,F,T))+SUM(C,FFWELL\_STO\_FLOWBACK(N,C,T));  
 EQ8(N,T).. FWELL\_OUT\_TRANS(N,T)=E=SUM(M,FFWELL\_TREAT\_TRANS(N,M,T))+SUM(D,FFWELL\_STO\_TRANS(N,D,T));  
 EQ9(N,T).. FWELL\_OUT\_PROD(N,T)=E=SUM(P,FFWELL\_TREAT\_PROD(N,P,T))+SUM(G,FFWELL\_STO\_PROD(N,G,T));  
 EQ10(F,T).. FTREAT\_IN\_FLOWBACK(F,T)=E=SUM(N,FFWELL\_TREAT\_FLOWBACK(N,F,T));  
 EQ11(M,T).. FTREAT\_IN\_TRANS(M,T)=E=SUM(N,FFWELL\_TREAT\_TRANS(N,M,T));  
 EQ12(P,T).. FTREAT\_IN\_PROD(P,T)=E=SUM(N,FFWELL\_TREAT\_PROD(N,P,T));  
 EQ13(F,T).. FTREAT\_OUT\_FLOWBACK(F,T)=E=SUM(B,FFTREAT\_REU\_FLOWBACK(F,B,T));  
 EQ14(M,T).. FTREAT\_OUT\_TRANS(M,T)=E=SUM(A,FFTREAT\_REU\_TRANS(M,A,T));  
 EQ15(P,T).. FTREAT\_OUT\_PROD(P,T)=E=SUM(E,FFTREAT\_REU\_PROD(P,E,T));  
 EQ16(B,T).. FREU\_FLOWBACK(B,T)=E=SUM(F,FFTREAT\_REU\_FLOWBACK(F,B,T));  
 EQ17(A,T).. FREU\_TRANS(A,T)=E=SUM(M,FFTREAT\_REU\_TRANS(M,A,T));  
 EQ18(E,T).. FREU\_PROD(E,T)=E=SUM(P,FFTREAT\_REU\_PROD(P,E,T));  
 EQ19(C,T).. FSTO\_IN\_FLOWBACK(C,T)=E=SUM(N,FFWELL\_STO\_FLOWBACK(N,C,T));  
 EQ20(D,T).. FSTO\_IN\_TRANS(D,T)=E=SUM(N,FFWELL\_STO\_TRANS(N,D,T));  
 EQ21(G,T).. FSTO\_IN\_PROD(G,T)=E=SUM(N,FFWELL\_STO\_PROD(N,G,T));  
 EQ22(C,T).. FSTO\_OUT\_FLOWBACK(C,T)=E=SUM(N,FFSTORAGE\_FLOWBACK(C,N,T));  
 EQ23(D,T).. FSTO\_OUT\_TRANS(D,T)=E=SUM(N,FFSTORAGE\_TRANS(D,N,T));  
 EQ24(G,T).. FSTO\_OUT\_PROD(G,T)=E=SUM(N,FFSTORAGE\_PROD(G,N,T));  
 EQ25(F,T).. FTREAT\_OUT\_FLOWBACK(F,T)=E=ALPHATREAT\_FLOWBACK(F)\*FTREAT\_IN\_FLOWBACK(F,T);  
 EQ26(M,T).. FTREAT\_OUT\_TRANS(M,T)=E=ALPHATREAT\_TRANS(M)\*FTREAT\_IN\_TRANS(M,T);  
 EQ27(P,T).. FTREAT\_OUT\_PROD(P,T)=E=ALPHATREAT\_PROD(P)\*FTREAT\_IN\_PROD(P,T);  
 EQ28(C,T)\$ (ORD(T)=1).. VSTO\_FLOWBACK(C,T)=E=VSTO\_INITIAL\_FLOWBACK(C)+HTIME\*(FSTO\_IN\_FLOWBACK(C,T)-FSTO\_OUT\_FLOWBACK(C,T));  
 EQ29(C,T)\$ (ORD(T)>1).. VSTO\_FLOWBACK(C,T)=E=VSTO\_FLOWBACK(C,T-1)+HTIME\*(FSTO\_IN\_FLOWBACK(C,T)-FSTO\_OUT\_FLOWBACK(C,T));  
 EQ30(C,T)\$ (ORD(T)=NONT).. VSTO\_FLOWBACK(C,T)=E=VSTO\_INITIAL\_FLOWBACK(C);  
 EQ31(D,T)\$ (ORD(T)=1).. VSTO\_TRANS(D,T)=E=VSTO\_INITIAL\_TRANS(D)+HTIME\*(FSTO\_IN\_TRANS(D,T)-FSTO\_OUT\_TRANS(D,T));  
 EQ32(D,T)\$ (ORD(T)>1).. VSTO\_TRANS(D,T)=E=VSTO\_TRANS(D,T-1)+HTIME\*(FSTO\_IN\_TRANS(D,T)-FSTO\_OUT\_TRANS(D,T));  
 EQ33(D,T)\$ (ORD(T)=NONT).. VSTO\_TRANS(D,T)=E=VSTO\_INITIAL\_TRANS(D);  
 EQ34(G,T)\$ (ORD(T)=1).. VSTO\_PROD(G,T)=E=VSTO\_INITIAL\_PROD(G)+HTIME\*(FSTO\_IN\_PROD(G,T)-FSTO\_OUT\_PROD(G,T));  
 EQ35(G,T)\$ (ORD(T)>1).. VSTO\_PROD(G,T)=E=VSTO\_PROD(G,T-1)+HTIME\*(FSTO\_IN\_PROD(G,T)-FSTO\_OUT\_PROD(G,T));  
 EQ36(G,T)\$ (ORD(T)=NONT).. VSTO\_PROD(G,T)=E=VSTO\_INITIAL\_PROD(G);  
 EQ37(F,T).. FTREAT\_CAP\_FLOWBACK(F)=G=FTREAT\_IN\_FLOWBACK(F,T);  
 EQ38(F).. FTREAT\_CAP\_FLOWBACK(F)=L=FTREAT\_MAX\_FLOWBACK(F)\*YTREAT\_FLOWBACK(F);  
 EQ39(M,T).. FTREAT\_CAP\_TRANS(M)=G=FTREAT\_IN\_TRANS(M,T);  
 EQ40(M).. FTREAT\_CAP\_TRANS(M)=L=FTREAT\_MAX\_TRANS(M)\*YTREAT\_TRANS(M);  
 EQ41(P,T).. FTREAT\_CAP\_PROD(P)=G=FTREAT\_IN\_PROD(P,T);  
 EQ42(P).. FTREAT\_CAP\_PROD(P)=L=FTREAT\_MAX\_PROD(P)\*YTREAT\_PROD(P);  
 EQ43(C,T).. VSTO\_CAP\_FLOWBACK(C)=G=VSTO\_FLOWBACK(C,T);  
 EQ44(C).. VSTO\_CAP\_FLOWBACK(C)=L=VSTO\_MAX\_FLOWBACK(C)\*YSTO\_FLOWBACK(C);  
 EQ45(D,T).. VSTO\_CAP\_TRANS(D)=G=VSTO\_TRANS(D,T);  
 EQ46(D).. VSTO\_CAP\_TRANS(D)=L=VSTO\_MAX\_TRANS(D)\*YSTO\_TRANS(D);  
 EQ47(G,T).. VSTO\_CAP\_PROD(G)=G=VSTO\_PROD(G,T);  
 EQ48(G).. VSTO\_CAP\_PROD(G)=L=VSTO\_MAX\_PROD(G)\*YSTO\_PROD(G);  
 EQ49.. TWR=E=HTIME\*SUM(T,FFRESH(T));  
 EQ50.. COSTFRESH=E=HTIME\*UCFRESH\*SUM(T,FFRESH(T));  
 EQ51.. COSTOP\_TREAT\_FLOWBACK=E=HTIME\*SUM((F,T),UOCTREAT\_FLOWBACK(F)\*FTREAT\_IN\_FLOWBACK(F,T));  
 EQ52.. COSTOP\_TREAT\_TRANS=E=HTIME\*SUM((M,T),UOCTREAT\_TRANS(M)\*FTREAT\_IN\_TRANS(M,T));  
 EQ53.. COSTOP\_TREAT\_PROD=E=HTIME\*SUM((P,T),UOCTREAT\_PROD(P)\*FTREAT\_IN\_PROD(P,T));  
 EQ54.. COSTTRANS\_FRESH=E=HTIME\*SUM((N,T),UTCFRESH(N)\*FFFRESH(N,T));  
 EQ55..  
 COSTTRANS\_FLOWBACK=E=HTIME\*SUM((N,F,T),UTCUSED\_FLOWBACK(N,F)\*FFWELL\_TREAT\_FLOWBACK(N,F,T));  
 EQ56.. COSTTRANS\_TRANS=E=HTIME\*SUM((N,M,T),UTCUSED\_TRANS(N,M)\*FFWELL\_TREAT\_TRANS(N,M,T));  
 EQ57.. COSTTRANS\_PROD=E=HTIME\*SUM((N,P,T),UTCUSED\_PROD(N,P)\*FFWELL\_TREAT\_PROD(N,P,T));  
 EQ58..  
 COSTTRANS\_TREAT\_REU\_FLOWBACK=E=HTIME\*SUM((F,B,T),UTCTREAT\_REU\_FLOWBACK(F,B)\*FFTREAT\_REU\_FLOWBACK(F,B,T));  
 EQ59..  
 COSTTRANS\_TREAT\_REU\_TRANS=E=HTIME\*SUM((M,A,T),UTCTREAT\_REU\_TRANS(M,A)\*FFTREAT\_REU\_TRANS(M,A,T));

EQ60..  
 COSTTRANS\_TREAT\_REU\_PROD=E=HTIME\*SUM((P,E,T),UTCTREAT\_REU\_PROD(P,E)\*FFTREAT\_REU\_PROD(P,E,T));  
 EQ61..  
 COSTTRANS\_WELL\_STO\_FLOWBACK=E=HTIME\*SUM((N,C,T),UTCWELL\_STO\_FLOWBACK(N,C)\*FFWELL\_STO\_FLOWBACK(N,C,T));  
 EQ62..  
 COSTTRANS\_WELL\_STO\_TRANS=E=HTIME\*SUM((N,D,T),UTCWELL\_STO\_TRANS(N,D)\*FFWELL\_STO\_TRANS(N,D,T));  
 EQ63.. COSTTRANS\_WELL\_STO\_PROD=E=HTIME\*SUM((N,G,T),UTCWELL\_STO\_PROD(N,G)\*FFWELL\_STO\_PROD(N,G,T));  
 EQ64..  
 COSTTRANS\_STO\_WELL\_FLOWBACK=E=HTIME\*SUM((C,N,T),UTCSTO\_WELL\_FLOWBACK(C,N)\*FFSTORAGE\_FLOWBACK(C,N,T));  
 EQ65..  
 COSTTRANS\_STO\_WELL\_TRANS=E=HTIME\*SUM((D,N,T),UTCSTO\_WELL\_TRANS(D,N)\*FFSTORAGE\_TRANS(D,N,T));  
 EQ66.. COSTTRANS\_STO\_WELL\_PROD=E=HTIME\*SUM((G,N,T),UTCSTO\_WELL\_PROD(G,N)\*FFSTORAGE\_PROD(G,N,T));  
 EQ67..  
 TOC=E=COSTFRESH+COSTOP\_TREAT\_FLOWBACK+COSTOP\_TREAT\_TRANS+COSTOP\_TREAT\_PROD+COSTTRANS\_FRESH+COSTTRANS\_FLOWBACK+COSTTRANS\_TRANS+COSTTRANS\_PROD+COSTTRANS\_TREAT\_REU\_FLOWBACK+COSTTRANS\_TREAT\_REU\_TRANS+COSTTRANS\_TREAT\_REU\_PROD+COSTTRANS\_WELL\_STO\_FLOWBACK+COSTTRANS\_WELL\_STO\_TRANS+COSTTRANS\_WELL\_STO\_PROD+COSTTRANS\_STO\_WELL\_FLOWBACK+COSTTRANS\_STO\_WELL\_TRANS+COSTTRANS\_STO\_WELL\_PROD;  
 EQ68..  
 CAPCOST\_TREAT\_FLOWBACK=E=KFFB\*SUM(F,((FCTREAT\_FLOWBACK\*YTREAT\_FLOWBACK(F)))+(VCTREAT\_FLOWBACK\*FTREAT\_CAP\_FLOWBACK(F)));  
 EQ69..  
 CAPCOST\_TREAT\_TRANS=E=KFTRANS\*SUM(M,((FCTREAT\_TRANS\*YTREAT\_TRANS(M)))+(VCTREAT\_TRANS\*FTREAT\_CAP\_TRANS(M)));  
 EQ70.. CAPCOST\_TREAT\_PROD=E=KFPROD  
 \*SUM(P,((FCTREAT\_PROD\*YTREAT\_PROD(P)))+(VCTREAT\_PROD\*FTREAT\_CAP\_PROD(P)));  
 EQ71..  
 CAPCOST\_STORAGE\_FLOWBACK=E=KFFB\*SUM(C,((FCSTORAGE\_FLOWBACK\*YSTO\_FLOWBACK(C)))+(VCSTORAGE\_FLOWBACK\*VSTO\_CAP\_FLOWBACK(C)));  
 EQ72..  
 CAPCOST\_STORAGE\_TRANS=E=KFTRANS\*SUM(D,((FCSTORAGE\_TRANS\*YSTO\_TRANS(D)))+(VCSTORAGE\_TRANS\*VSTO\_CAP\_TRANS(D)));  
 EQ73..  
 CAPCOST\_STORAGE\_PROD=E=KFPROD\*SUM(G,((FCSTORAGE\_PROD\*YSTO\_PROD(G)))+(VCSTORAGE\_PROD\*VSTO\_CAP\_PROD(G)));  
 EQ74..  
 TCC=E=CAPCOST\_TREAT\_FLOWBACK+CAPCOST\_TREAT\_TRANS+CAPCOST\_TREAT\_PROD+CAPCOST\_STORAGE\_FLOWBACK+CAPCOST\_STORAGE\_TRANS+CAPCOST\_STORAGE\_PROD;  
 EQ75..  
 TVC=E=HTIME\*(SUM((B,T),(UVCREU\_FLOWBACK(B)\*FREU\_FLOWBACK(B,T))+SUM((A,T),(UVCREU\_TRANS(A)\*FREU\_TRANS(A,T)))+SUM((E,T),(UVCREU\_PROD(E)\*FREU\_PROD(E,T))));  
 EQ76.. TAC=E=TOC+TCC-TVC;  
  
 MODEL SHALE/ALL/;  
  
 SOLVE SHALE USING MIIP MINIMIZING TAC;