

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE IGUAL SERVICIO PARA EL  
SUMINISTRO DE PROPANTES A UN YACIMIENTO NO CONVENCIONAL EN EL  
VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

LAURA DANIELA GARCÉS CARREÑO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA

2016

EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE IGUAL SERVICIO PARA EL  
SUMINISTRO DE PROPANTES A UN YACIMIENTO NO CONVENCIONAL EN EL  
VALLE MEDIO DEL MAGDALENA

LAURA DANIELA GARCÉS CARREÑO

Monografía de grado para optar al título de Especialista en Evaluación y Gerencia  
de Proyectos

Director

EDWIN ALBERTO GARAVITO HERNÁNDEZ

Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECÁNICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA

2016

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco al profesor Edwin Alberto Garavito Hernández, que como director de este trabajo, me oriento, apoyo y corrigió. Ha sido un privilegio contar con su guía y ayuda.

Al profesor Juan Benjamín Duarte Duarte por su paciencia, dedicación y confianza, sin sus valiosos aportes no hubiera sido posible alcanzar este logro.

Al grupo de investigación de Estabilidad de Pozo (GIEP) por acogerme y darme la oportunidad de desarrollar este trabajo.

A M.Sc. Darwin Mateus Tarazona y al M.Sc. Edgar Pérez Carrillo por direccionar este trabajo en el Instituto Colombiano del Petróleo y por sus asesorías, sugerencias y consejos que contribuyeron al mejoramiento de la investigación.

A mis compañeros de especialización que aportaron a mi crecimiento profesional y humano, y con los cuales pase momentos muy amenos.

A mi madre, que me permitió existir y me ha brindado su apoyo incondicional en todos los ámbitos de mi vida.

## CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	13
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
2. OBJETIVOS	16
2.1. OBJETIVO GENERAL	16
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	17
4. MARCO TEÓRICO	19
4.1. LOGÍSTICA DE SUPERFICIE	19
4.2. PROPANTE	20
4.2.1. Tipos de propantes	21
4.2.1.1. Arena natural	21
4.2.1.2. Propantes resinados	22
4.2.1.3. Cerámicos	22
4.3. FUENTES DE SUMINISTRO DE PROPANTES A NIVEL MUNDIAL	23
4.4. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE PROPANTES	27
4.5. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE MATERIAL PROPANTE EN COLOMBIA	28
4.6. FORMAS DE SUPLIR LA DEMANDA DE PROPANTES EN COLOMBIA	32

4.7.	PROCESO ACTUAL DE SUMINISTRO DE PROPANTES A ECOPETROL	33
4.7.1.	Tipo de propante y tamaño	35
4.8.	YACIMIENTO VACA MUERTA- PROVINCIA DE NEUQUÉN-ARGENTINA	35
4.9.	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE IGUAL SERVICIO	38
4.10.	SIMULACIÓN	39
4.10.1.	Tipos de simulación	39
4.10.1.1.	Simulación estática	40
4.10.1.2.	Simulación continua	40
4.10.1.3.	Simulación de eventos discretos	41
4.11.	FACTORES A CONSIDERAR EN EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN	41
4.11.1.	Desarrollo del modelo de simulación	43
4.11.2.	Diseño experimental	44
4.11.3.	Análisis de simulación	45
4.12.	GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE PROPANTES MEDIANTE SIMULACIÓN	45
4.13.	SIMULACIÓN POR MONTECARLO	46
4.14.	DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD	47
4.15.	PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE	49
4.16.	NÚMERO DE ITERACIONES	50
4.17.	ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR	51
5.	METODOLOGÍA	53
5.1.	ETAPA 1	53
5.2.	ETAPA 2	56
5.2.1.	Variables aleatorias	56
5.2.2.	Parámetros	59

5.3.	ETAPA 3	61
6.	APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	62
6.1.	NÚMERO DE ITERACIONES	62
6.2.	RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	63
6.3.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	74
7.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	81
	BIBLIOGRAFIA	84

## LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Consumo estimado de propante base arena natural en Colombia	29
Tabla 2. Costo de propante puesto en yacimiento (USD/libra)	30
Tabla 3. Comparativo de CPE para las diferentes alternativas	33
Tabla 4. Variables de las alternativas seleccionadas	55
Tabla 5. Distribución de probabilidad de las variables de entrada	56
Tabla 6. Valores asociados a las variables determinísticas de entrada	59
Tabla 7. Descuento por volumen de compra de propante	61
Tabla 8. Estructura de costos mediante una CST (alternativa 1)	64
Tabla 9. Estructura de costos mediante un intermediario (alternativa 2)	65
Tabla 10. Estructura de costos mediante importación directa (alternativa 3)	66
Tabla 11. Resultados simulación	67
Tabla 12. Gráficos tornado para la alternativa 1 (CST)	74
Tabla 13. Gráficos tornado para la alternativa 2 (Intermediario)	76
Tabla 14. Gráficos tornado para la alternativa 3 (Importación directa)	78

## LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Tipos de material propante	23
Figura 2. Proveedores arena frac en Norte América	25
Figura 3. Proveedores líderes de propantes en el mundo	26
Figura 4. Consumo de propante por tipo en EE. UU. (Billones de libras)	29
Figura 5. Distribución por material propante	31
Figura 6. Evolución de la cantidad de pozos perforados entre los años 2012 a 2030 en el reservorio de Vaca Muerta (argentina).	37
Figura 7. Evolución del número de etapas de fractura por pozo entre los años 2012 a 2030 en el reservorio de Vaca Muerta (argentina).	37
Figura 8. Evolución de los requerimientos de propante para los años 2012 a 2030 en el reservorio de Vaca Muerta (argentina).	38
Figura 9. Principales distribuciones de probabilidad	48
Figura 10. Gráficas de caja de Costo total para propante tipo cerámico	68
Figura 11. Gráficas de caja de Costo total para propante tipo arena	70
Figura 12. Media del costo total de la simulación	71
Figura 13. Desviación estándar del costo total de la simulación	72
Figura 14. Costo Unitario	73

## RESUMEN

**TÍTULO:** EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE IGUAL SERVICIO PARA EL SUMINISTRO DE PROPANTES A UN YACIMIENTO NO CONVENCIONAL EN EL VALLE MEDIO DEL MAGDALENA\*

**Autor:** LAURA DANIELA GARCÉS CARREÑO\*\*

**PALABRAS CLAVE:** YACIMIENTOS NO CONVENCIONALES, PROPANTES, SIMULACIÓN DE MONTECARLO, ALTERNATIVAS DE IGUAL SERVICIO.

### **DESCRIPCIÓN:**

La creciente demanda de energía en el mundo y el agotamiento de los recursos convencionales, han obligado a los productores de hidrocarburos a incursionar en la exploración y explotación de recursos no convencionales, los cuales generan oportunidades potenciales de abastecimiento pero requieren un grado de dificultad mayor en su operación dada las condiciones de permeabilidad de la roca, que requiere de técnicas como el fracturamiento hidráulico para su extracción, cuyos insumos principales son el agua y el agente de sostén, los cuales generan desafíos de suministro que impactan directamente el tiempo y costo de completamiento del pozo.

Considerando lo enunciado anteriormente, en el presente trabajo se busca evaluar tres alternativas de suministro de propantes a un pozo en un yacimiento no convencional, con el fin de determinar la de menor costo. Las alternativas de suministro planteadas son: comprar a una Compañía de Servicio Técnico (CST), comprar a un intermediario en Colombia y comprar al fabricante en China. La estimación del costo de cada una de las alternativas se realizó mediante simulación por Monte Carlo.

Teniendo en cuenta los supuestos y condiciones dadas, los resultados obtenidos indican que la mejor alternativa para el suministro de propantes a pozo, es la alternativa de importación directa por parte de la empresa operadora.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Especialización en Evaluación y Gerencia de Proyectos. Director: Edwin Alberto Garavito, Candidato a Magister en Ingeniería Industrial.

## ABSTRACT

**TITLE:** EQUAL SERVICE COMPARISON OF ALTERNATIVES FOR THE SUPPLY OF PROPPANTS AN UNCONVENTIONAL RESERVOIR IN THE VALLE MEDIO DEL MAGDALENA \*

**AUTHOR:** LAURA DANIELA GARCÉS CARREÑO\*\*

**KEYWORDS:** UNCONVENTIONAL RESERVOIRS, PROPPANTS, MONTE CARLO SIMULATION, EQUAL SERVICE ALTERNATIVES.

### **DESCRIPTION:**

The growing demand for energy in the world and the depletion of conventional resources, have forced oil producers to venture into the exploration and exploitation of unconventional resources, which generate potential opportunities of supply but require a higher degree of difficulty operation given the conditions of permeability of the rock, which requires techniques such as hydraulic fracturing for extraction, whose main inputs are water and proppant, which generate supply challenges that directly impact the time and cost of completion from the well.

Whereas stated above, this paper seeks to evaluate three alternative supply proppant into a well in an unconventional reservoir, in order to determine the lowest cost. Supply alternatives raised are: buy a Technical Service Company (TSC), buy from an intermediary in Colombia and buy the manufacturer in China. The estimated cost of each of the alternatives was performed using Monte Carlo simulation.

Considering the assumptions and conditions given, the results indicate that the best alternative for the supply of proppants to the well, is the alternative of direct imports by the operating company.

---

\* Bachelor Thesis

\*\* Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Especialización en Evaluación y Gerencia de Proyectos. Director: Edwin Alberto Garavito, Candidato a Magister en Ingeniería Industrial.

## INTRODUCCIÓN

La explotación petrolífera tradicionalmente se ha ejecutado a través de producción bajo condiciones convencionales, sin embargo, en los últimos años se han desarrollado técnicas de explotación para extraer gas y petróleo en yacimientos no convencionales, entre las cuales se encuentra el fracturamiento hidráulico, que consiste en generar grietas en la roca mediante la inyección a alta presión de agua mezclada con agentes de sostén y químicos, buscando que el gas y el petróleo fluyan hacia la superficie<sup>1</sup>.

La creciente demanda de energía en el mundo y el agotamiento de los recursos convencionales, han obligado a los productores de hidrocarburos a incursionar en la exploración y explotación de recursos no convencionales, los cuales generan oportunidades potenciales de abastecimiento pero requieren un grado de dificultad mayor en su operación dada las condiciones de permeabilidad de la roca. Teniendo en cuenta lo anterior, la industria de Shale puede representar un aporte significativo para cubrir las necesidades de crudo y gas en Colombia a largo plazo; sin embargo, su operación está en desarrollo y es preciso tener en cuenta temas claves como: capital económico, regulaciones gubernamentales, cuidado del medio ambiente, seguridad y relaciones con la comunidad, así como los procesos logísticos asociados al desarrollo del shale plays. Este último ítem ha generado desafíos principalmente en lo relacionado con el suministro de agua y agentes de sostén para completar el pozo a tiempo y a unos costos relativamente aceptables de acuerdo al precio del crudo. Por lo tanto estos dos insumos, agua y propante, juegan un papel

---

<sup>1</sup> SOVACOOOL, Benjamin K. Cornucopia of curse? Reviewing the costs and benefits of shale gas hydraulic fracturing (fracking). En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Septiembre, 2014. vol. 37, p. 249-264.

importante en el desarrollo de las operaciones de explotación de shale plays y concretamente para la industria petrolera en pozos en donde se requiere este tipo de técnica para su explotación.

Teniendo en cuenta la situación actual de las operaciones de suministro de propantes en Colombia, caracterizada por la ausencia de fabricantes del tipo cerámico, y sin explotación de arenas para fracturamiento, se justifica el presente trabajo que busca evaluar tres alternativas de suministro de propantes, de tal forma que se pueda garantizar que este insumo esté disponible al menor costo posible, y así contar con precios competitivos para la comercialización del crudo a nivel mundial. La primera alternativa de suministro es a través de una compañía de servicio técnico (CST), la cual se encargaría de importar el propante, almacenarlo y bombearlo in situ; la segunda alternativa es por medio de un intermediario en Colombia, quien realizaría la importación y posiblemente el almacenamiento; y por último, la tercera alternativa se centra en evaluar la operación de importación por parte de la empresa operadora del yacimiento no convencional, la cual se encargaría de las operaciones de compra al proveedor internacional (China-USA), tramites portuarios, transporte internacional y nacional, almacenamiento, administración y bombeo in situ.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El éxito de las operaciones de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales depende en gran medida del agente de sostén, el cual debe estar dispuesto en el lugar y tiempo estimado, con la calidad requerida, en las cantidades solicitadas y al mejor precio. Sin embargo, una de las problemáticas actuales de las empresas operadoras en Colombia, es la poca oferta de proveedores para suministrar el material propante al pozo, teniendo en cuenta que la mayor parte del mercado lo tienen las Compañías de Servicio Técnico, lo cual afecta el precio considerablemente.

Uno de los mayores desafíos de las compañías de la industria del petróleo es reducir los costos asociados al suministro de los agentes de sostén a pozos de formación shale, con el fin de disminuir los costos de completamiento y por ende maximizar la rentabilidad. Por ello, es importante plantear, evaluar y analizar varias alternativas de suministro de propantes a pozo que sean favorables para Ecopetrol y seleccionar la más adecuada tomando como criterio el menor costo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. OBJETIVO GENERAL**

Evaluar alternativas de suministro de propantes a un yacimiento no convencional de hidrocarburos, mediante el uso de una herramienta de simulación, con el fin de determinar la de menor costo.

### **2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- ✓ Revisar la literatura científica publicada acerca de los propantes y sus procesos de suministro a pozos no convencionales, a fin de determinar las alternativas de suministro a estudiar.
- ✓ Definir las principales variables estocásticas y parámetros determinísticos que impactan los costos del proceso de suministro de propantes de las alternativas seleccionadas.
- ✓ Evaluar mediante simulación de Monte Carlo las alternativas planteadas para propante cerámico y arena.
- ✓ Analizar los resultados generados a partir de simulación Monte Carlo, con el fin de obtener conclusiones acerca de la alternativa de adquisición de agentes de sostén para la fractura de menor costo.

### 3. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

La explotación petrolífera tradicionalmente se ha ejecutado a través de producción bajo condiciones convencionales, sin embargo, en los últimos años se han desarrollado técnicas de explotación para extraer gas y petróleo en yacimientos no convencionales, entre las cuales se encuentra el fracturamiento hidráulico, que consiste en generar grietas en la roca mediante la inyección a alta presión de agua mezclada con agentes de sostén y químicos, buscando que el gas y el petróleo fluyan hacia la superficie (Sovacool, 2014).

La creciente demanda de energía en el mundo y el agotamiento de los recursos convencionales, han obligado a los productores de hidrocarburos a incursionar en la exploración y explotación de recursos no convencionales, los cuales generan oportunidades potenciales de abastecimiento pero requieren un grado de dificultad mayor en su operación dada las condiciones de permeabilidad de la roca. De acuerdo con lo anterior la industria de Shale puede representar una aportación significativa para cubrir las necesidades de crudo y gas en Colombia a largo plazo; sin embargo, su operación está en desarrollo y es preciso tener en cuenta temas claves como: capital económico, regulaciones gubernamentales, cuidado del medio ambiente, seguridad y relaciones con la comunidad, así como los procesos logísticos asociados al desarrollo del shale plays. Este último ítem ha generado desafíos principalmente en lo relacionado con el suministro de agua y agentes de sostén para completar el pozo a tiempo y a unos costos relativamente aceptables de acuerdo al precio del crudo. Por lo tanto estos dos insumos, agua y propante, juegan un papel importante en el desarrollo de las operaciones de explotación de shale plays y concretamente para la industria petrolera en pozos en donde se requiere este tipo de técnica para su explotación.

Teniendo en cuenta la novedad del tema y la situación actual de las operaciones de suministro de propantes en Colombia, en la cual no hay en el país fabricantes de propante tipo cerámico, ni explotación de arenas para fracturamiento, se justifica el presente trabajo que busca evaluar alternativas de suministro de propantes, de tal forma que se pueda garantizar que este insumo esté disponible al menor costo posible, y así contar con precios competitivos para la comercialización del crudo a nivel mundial.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1. LOGÍSTICA DE SUPERFICIE

La logística de superficie asociada al desarrollo de un pozo no convencional, se relaciona con la infraestructura requerida para el manejo tanto de los insumos de fractura (terminación de pozos) como de los hidrocarburos producidos (facilidades de producción). Sin embargo, la logística de terminación de pozos es la que genera los mayores desafíos, dado el gran volumen de fluido de fractura y de agentes de sostén que se requieren para la estimulación, y que demandan soluciones eficientes en temas de abastecimiento, transporte y almacenamiento<sup>2</sup>.

En países de América Latina, como Argentina, México y Colombia, se presentan mayores dificultades a la hora de gestionar la logística de superficie, dado que sus operaciones están en reciente desarrollo. En **Argentina** una de las problemáticas que se presentó en el perforado y completado de pozos piloto, estaba relacionada con la importación de los agentes de sostén suficientes y la identificación de la fuente para obtener el agua; teniendo en cuenta lo anterior los esfuerzos se han centrado en analizar el tratamiento, reglamento y transporte del agua, así como el suministro de agentes de sostén y las soluciones logísticas para garantizar que tanto el agua como los apuntalantes estén disponibles para la fractura, buscando alcanzar una competitividad en costos similar a la de los Estados Unidos<sup>3</sup>. En **México** la dificultad está en los altos costos logísticos causados por la rapidez del ciclo de

---

<sup>2</sup> TYMKO, Dean W. Shale Gas Well Completion Logistics. *En*: SPE Annual Technical Conference (19-22, Septiembre, 2010: Florencia, Italia). SPE International, 2010. 8 p.

<sup>3</sup> CODESEIRA, Luciano P. Análisis Espacial del Desarrollo del Shale Gas de Vaca Muerta. Tesis de Maestría Interdisciplinaria en Energía. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2013. 98 p.

producción, que alcanza picos y declives rápidamente, haciendo que los costos de mantener los equipos y el personal en un solo lugar por mucho tiempo aumenten notoriamente. Además las empresas de explotación de México no parecen adaptadas a esta dinámica logística y existe escasez de proveedores especializados y de trabajadores capacitados, por lo que se prevé que el aprovechamiento de este recurso en este país será lento. En **Colombia** la baja accesibilidad a materiales localmente, hace necesario la contratación de proveedores internacionales, a lo que se suma la baja disposición, disponibilidad y calidad de las carreteras y la imposibilidad de hacer transporte multimodal (fluvial y férreo), que son factores que impactan fuertemente en variables como el tiempo y el costo; en respuesta a esto se vienen promoviendo los eventos académicos<sup>4</sup> relacionados con logística del shale que incluye temas de infraestructura y desarrollo de la cadena de abastecimiento para los recursos no convencionales.

## 4.2. PROPANTE

También denominado apuntalante o agente de sostén, es el material que permanece en la fractura manteniéndola abierta, estableciendo un canal conductivo para la afluencia de fluido hacia el pozo. Lo ideal es que produzca la máxima permeabilidad. Las propiedades del propante que afectan el éxito de la fractura hidráulica incluyen la redondez y esfericidad del grano, la resistencia al aplastamiento (crushing), el tamaño y distribución del grano, la calidad (cantidad de

---

<sup>4</sup> Segunda edición SHALE COLOMBIA: Congreso para el desarrollo de los no convencionales. [En línea]. Octubre de 2014 [Citado 6 de noviembre de 2014]. Disponible en internet <<http://www.espanol-shale-colombia-2014.com/>>

impurezas), la porosidad, la conductividad y la densidad de éste. Generalmente mayores volúmenes de propante permiten más fracturas y facilitan un flujo de retorno más rápido del pozo productor<sup>5</sup>.

**4.2.1. Tipos de Propantes.** Como no se puede bombear cualquier tipo de apuntalante al pozo, existen distintos tipos que reúnen cualidades diferentes, tales como: la arena natural, que se utiliza en granulometrías finas, propantes resinados, que son sometidos a un proceso que les permite mejorar la permeabilidad y los cerámicos, que son artificiales y que soportan más presión<sup>6</sup>.

**4.2.1.1 Arena natural.** Se refiere a arenas sílicas (cuarzo de alta pureza) depositadas por procesos naturales, que dependiendo de sus propiedades químicas y físicas, sus procesos y adecuación, puede ser utilizada como agente de sostén en fracturas hidráulicas. También es conocida como arena frac en la industria del petróleo.

A diferencia de la arena común que se siente arenosa al tacto, la arena de sílice se siente más suave como resultado de la forma esférica de los granos individuales.

---

<sup>5</sup> CABALLERO MUÑOZ, Steven y CARRILLO MESA, Beatriz H. Selección del material propante en procesos de fracturamiento hidráulico en un pozo petrolero. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 2012. 204 p.

<sup>6</sup> What is a Proppant? [En línea]. Coast 2 Coast Ceramics LLC. [Citado 10 de marzo de 2015]. Disponible en internet <<http://www.coast2coastceramics.com/what-is-a-proppant.php>>

La calidad de los agentes de sostén de este tipo depende de las características de la cantera y de la eficiencia de procesamiento del fabricante. La arena es el propante de mayor uso y el más conocido, por su disponibilidad en el mercado y su bajo costo. Su principal desventaja es la baja conductividad que posee cuando se cierra la fractura.

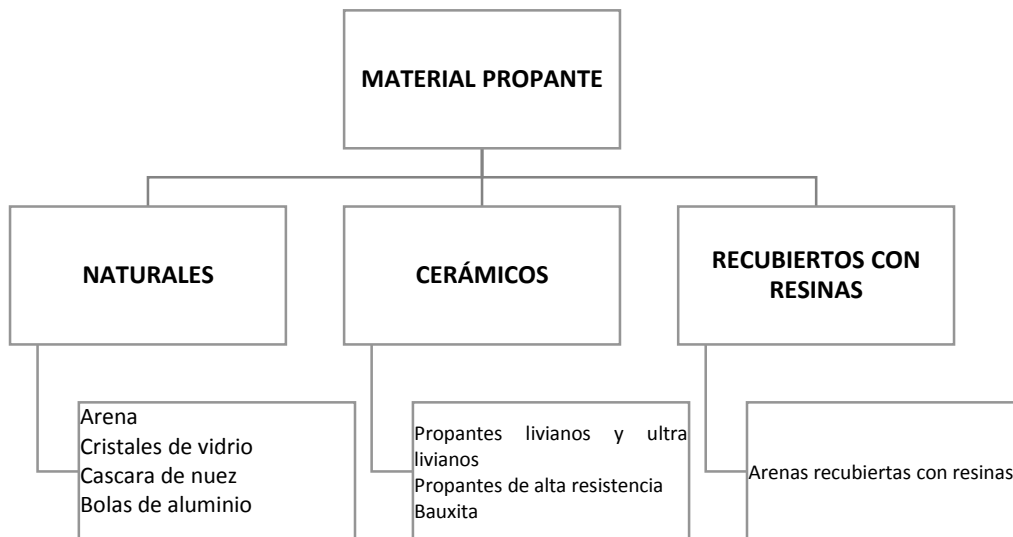
**4.2.1.2 Propantes resinados.** Es un agente de sostén como arena natural o cerámica, recubierto de una fina película de resina, que mejora las propiedades del propante y reduce la angularidad del grano, lo que conduce a:

- Mejorar la fuerza efectiva del propante mediante la distribución de la carga de presión de manera uniforme.
- Atrapar piezas de agente de sostén finas.
- Unir las partículas individuales bajo la intensa presión y temperatura de la fractura, de modo que se pueda minimizar el contraflujo del apuntalante.

**4.2.1.3 Cerámicos.** Tiene grandes ventajas respecto a los otros tipos de apuntalantes, porque al ser un material artificial, sus esferas son prácticamente perfectas y por lo tanto tienen una conductividad mucho mejor. Se caracteriza por su resistencia a la alta presión y temperatura y porque no se deforma en el pozo.

En la figura 1 se muestra un mapa conceptual que muestra los principales tipos de propantes según su clasificación.

Figura 1. Tipos de material propante



**Fuente:** Steven Caballero Muñoz, Beatriz H. Carrillo Mesa. Selección del material propante en procesos de fracturamiento hidráulico en un pozo petrolero.

#### 4.3. FUENTES DE SUMINISTRO DE PROPANTES A NIVEL MUNDIAL

El mercado de la arena frac se compone principalmente por mercados locales en los países donde se explotan los recursos no convencionales, esto debido a que su costo es relativamente bajo, se cuenta con canteras para su extracción y facilidades

para su transporte; el mercado de los propantes resinados está compuesto por mercados nacionales, por exportaciones de Norte América y en menor medida exportaciones de otros países; y el mercado de los propantes cerámicos, aunque son los más costosos de todos por sus propiedades de fractura, poseen una mayor demanda y son considerados un mercado global, por lo cual son exportados por diferentes países en el mundo<sup>7</sup>, unas de las principales empresas que surten este mercado son Carbo Ceramic<sup>8</sup> con sede en Estados Unidos y Saint-Gobain NorPro, un importante proveedor a nivel internacional que ofrece productos a base de cerámica sumamente avanzados, con nueve puntos de fabricación localizados en Estados Unidos, Alemania, China y Venezuela<sup>9</sup>.

En Estados Unidos el suministro de agente de sostén no es un problema, dado que existe un mercado local consolidado que facilita el aprovisionamiento de esta materia prima. Por ejemplo, Eagle Ford tiene dos fuentes de suministro de propantes cerámicos ultralivianos, una en Georgia y otra en China; y las arenas naturales las extrae de la Región de los Grandes Lagos (Michigan, Wisconsin y Ohio). De acuerdo con la figura 2, los proveedores de arena para fracturamiento en Norte América para el año 2014 alcanzan las 50 empresas, de las cuales las 10 principales suplen el 49% de la cantidad demanda dejando el 51% restante a 40 compañías con una capacidad de suministro más baja.

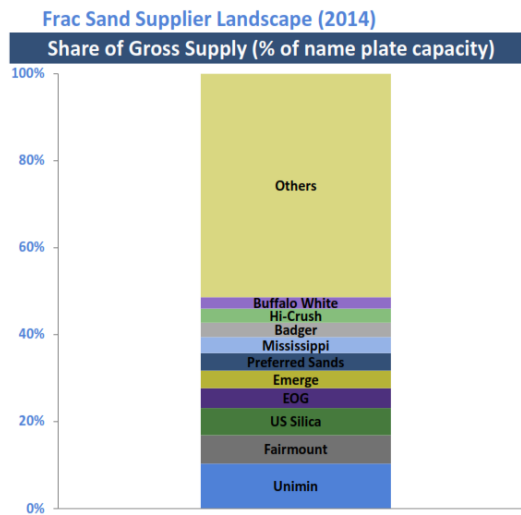
---

<sup>7</sup> PAC WEST: PARTNERS CONSULTING. North America Frac Sand Outlook. EN: SME Wisconsin Annual Conference. (Octubre, 2014: Eau Claire, WI USA). 2014. 40 p.

<sup>8</sup> MADRID, Marcelo. Agentes apuntalantes - Aspectos a considerar en el diseño de fracturamiento hidráulico. [En línea]. Portal del petróleo. [Citado 10 de marzo de 2015]. Disponible en internet <<http://www.portaldelpetroleo.com/2011/12/agentes-apuntalantes-aspectos.html>>

<sup>9</sup> Soluciones de cerámica orientadas a la tecnología para la industria de hidrocarburos. [En línea]. Saint-Gobain NorPro. [Citado 15 de abril de 2015]. Disponible en internet <<http://www.norpro.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGnorpro/Documents/NorproBro-Spanish.pdf>>

Figura 2. Proveedores arena frac en Norte América



**Fuente:** PAC WEST: Partners Consulting. North America Frac Sand Outlook.

En Argentina, donde recientemente se ha incursionado en operaciones de fracturamiento hidráulico el mercado de propantes no está tan consolidado, por lo cual parte de la arena natural y resinada, así como la totalidad de los cerámicos se importan de Estados Unidos, China y Brasil. Debido a los depósitos naturales descubiertos, la parte restante de arena natural es abastecida por empresas argentinas (Minera líder, Goldinka Resources S.A, etc.), que mediante diferentes procesos han logrado granulometrías aptas para el desarrollo de las actividades de fractura. Además recientemente han encontrado una cantera de arenas en Santa Lucía-Uruguay con propiedades que superan las normas ISO 13503-2, y que podría ser fuente de aprovisionamiento de esta materia prima a través de los puertos en

Montevideo (Uruguay) y San Antonio del oeste (Argentina). Esto último aporta ventajas de logística y distribución, que se evidencia en menores costos<sup>10</sup>.

En la figura 3 se presenta los proveedores líderes a nivel mundial en el suministro de propantes categorizados por el tipo de propante que ofrecen.

Figura 3. Proveedores líderes de propantes en el mundo



**Fuente:** Visiongain.Proppants Market 2013-2023.

<sup>10</sup> South American Silica Corp. aplica para obtener una concesión en Uruguay luego de haber recibido resultados positivos en las pruebas realizadas a las arenas a ser utilizadas dentro del proceso de fracturación hidráulica. [En línea]. Toronto (Cánada): U308CORP, 2014-[Citado 14 de septiembre de 2015]. Disponible en internet<[http://u308corp.com/docs/Press\\_Releases/2014/Spanish/South%20American%20Silica%20CorpSpanish\\_GB.pdf](http://u308corp.com/docs/Press_Releases/2014/Spanish/South%20American%20Silica%20CorpSpanish_GB.pdf)>.

#### 4.4. TRANSPORTE Y ALMACENAMIENTO DE PROPANTES

Para el suministro de agentes de sostén en Estados Unidos, específicamente en Eagle Ford, los productos nacionales viajan por tren hacia el sur de Texas y de ahí se transfieren en camiones para su entrega en pozo. El propante cerámico, viaja por tren en bolsas de 3000 libras en camiones desde la fábrica hasta el puerto en Shanghái y de allí, por barco, hasta el puerto de Texas. Luego lo llevan en camiones hasta un depósito y por último se lleva en camiones al pozo<sup>11</sup>.

En el caso de Argentina, actualmente el transporte de arena natural de fuentes locales se realiza a través de camiones con capacidad de 30 toneladas (50 camiones por día por pozo); sin embargo, para evitar que las rutas colapsen, algunas operadoras regionales han instalado lugares de acopio<sup>12</sup>, un ejemplo de esto es la empresa Halliburton que recientemente inauguró la primera planta de almacenamiento y distribución de apuntalante, para dar soporte a sus clientes en operaciones no convencionales, mejorando la productividad y disminuyendo costos. La planta cuenta con un depósito con tres silos de 600 toneladas de capacidad cada uno y una banda transportadora vertical de 34 metros de altura que facilita las operaciones de carga en las tolvas transportadas por los camiones, las cuales

---

<sup>11</sup> PETROTECNIA. La elección de la arena es una de las decisiones más importantes en la etapa exploratoria. EN: Petrotecnia. Agosto, 2012. p. 70-72.

<sup>12</sup> Claves sobre la arena, insumo central del mundo shale. [En línea]. Observatorio petrolero sur. [Citado 20 de marzo de 2015]. Disponible en internet <<http://www.opsur.org.ar/blog/2013/11/17/claves-sobre-la-arena-insumo-central-del-mundo-shale/>>

tienen una capacidad de descarga neumática que permite cargar sistemas “mountain mover en pozo”<sup>13</sup>.

#### **4.5. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA DE MATERIAL PROPANTE EN COLOMBIA**

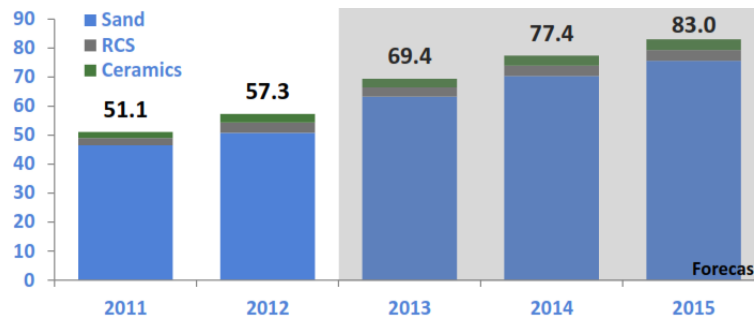
Teniendo en cuenta que las operaciones de fracturamiento hidráulico en Colombia se encuentran en una fase piloto, es decir, no se han masificado, la demanda de propantes es baja comparada con países como Estados Unidos.

En la figura 4 se presentan los consumos estimados para Estados Unidos por tipo de propante desde el año 2011 hasta el año 2015, en esta se puede observar que los consumos en los tres últimos años superan aproximadamente los 70 billones de libras, que prácticamente en su totalidad corresponden a propante tipo arena. Adicional a esto se observan los consumos de arena (propante de uso más común) estimados para Colombia para los años 2012, 2013 y 2014 (Ver tabla 1) los cuales no alcanzan los 30 millones de libras.

---

<sup>13</sup> Halliburton inaugura la primera planta de almacenamiento y distribución en la Argentina. [En línea]. Argentina: Revista Petroquímica. [Citado 10 de octubre de 2014]. Disponible en internet <<http://revistapetroquimica.com/halliburton-inaugura-la-primera-planta-de-almacenamiento-y-distribucion-en-la-Argentina/>>

Figura 4. Consumo de propante por tipo en EE. UU. (Billones de libras)



**Fuente:** Samir Nangia. Proppant Market Analysis. Pac West: Consulting Partners.

Tabla 1. Consumo estimado de propante base arena natural en Colombia

Año	Convencionales	No convencionales	Total
	Millones de libras		
2012	2,6	0,6	3,2
2013	2,2	2,8	5
2014	1,8	23	24,8

**Fuente:** Rubén Castillo, Alirio Leal. Propantes en shale plays: evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el piloto de shale gas. Bucaramanga: Ecopetrol.

De acuerdo con los consumos presentados anteriormente para Estados Unidos y Colombia, se podría decir que la cantidad demanda en Colombia es considerablemente pequeña, lo cual influye directamente en el costo de suministro de estos. Para el caso Colombiano el costo promedio puesto en pozo por libra de propante natural es de 0.6 USD<sup>14</sup> y el costo promedio de propante cerámico por

<sup>14</sup> TONCEL HERNÁNDEZ, Enrique A. Factibilidad técnica y financiera para la fabricación de material propante, base arena natural, utilizado en el fracturamiento hidráulico en Colombia. Trabajo de grado

libra oscila entre 1 USD y 1,2 USD<sup>15</sup>, mientras que en Estados Unidos el costo promedio por libra de apuntalante natural en pozo es de 0,1 USD<sup>16</sup> y de apuntalante cerámico esta entre 0.28 USD y 0.35 USD. Incluso en Argentina, los precios de los propantes puestos en el yacimiento son más cercanos a los de América del Norte; el costo es de 0,1 USD a 0,5 USD para arenas naturales y de 0,4 USD a 0,6 USD para propantes cerámicos<sup>17</sup>. (Ver resumen en tabla 2).

Tabla 2. Costo de propante puesto en yacimiento (USD/libra)

Tipo de Propante	Estados Unidos	Argentina	Colombia
Arena Natural	0,1	0,1 - 0,25	0,6
Cerámicos	0,28 - 0,35	0,4 - 0,6	1 - 1,2

**Fuente:** Elaboración propia con datos de Toncel Hernández, E. (2013); Serrano Serrano, D. (2011); Petrotecnia. (2012); y Peñaranda, V. F. (2014).

---

ingeniero de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. 2013. 132 p.

<sup>15</sup> SERRANO SERRANO, Daniela. Factibilidad técnica y económica del uso de propantes ultralivianos en el fracturamiento hidráulico de pozos: aplicación en un campo colombiano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. 2011. 109 p.

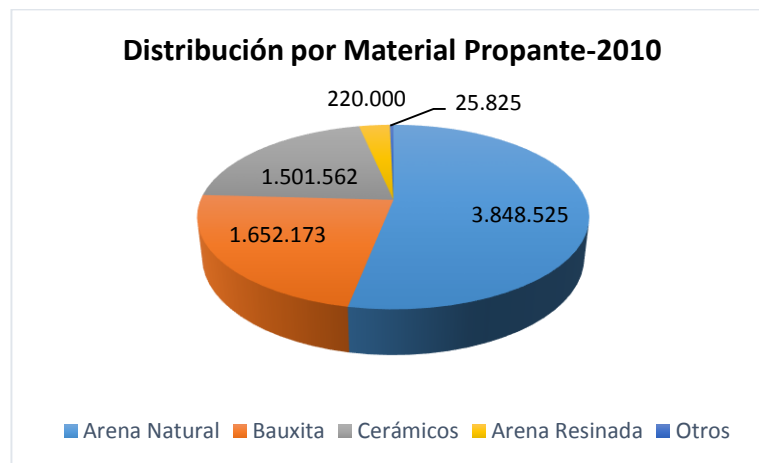
<sup>16</sup> PETROTECNIA. Op. cit., p.70-72.

<sup>17</sup> PEÑARANDA, Victoria F. Arenas más allá del acatamiento a las normas. EN: Petrotecnia. Junio, 2014. p. 66-81.

Así mismo en la figura 5 se observa que los propantes de mayor consumo durante el 2010 en Colombia Fueron<sup>18</sup>:

- Arena natural 16/30 y 12/20 (50,62%).
- Bauxita 16/20, 14/30 y 20/40 (24%).
- LWC 16/20 y 20/40 (21,81%).
- RCS 20/40 (3,2%).
- Otros (0.38%).

Figura 5. Distribución por material propante



**Fuente:** Rubén Castillo Núñez, Alirio Leal Hernández. Estudio básico de mercado para el suministro de propantes a nivel local, para yacimientos de shale gas.

<sup>18</sup> CASTILLO NÚÑEZ, Rubén D. y LEAL HERNÁNDEZ, Alirio. Estudio básico de mercado para el suministro de propantes a nivel local, para yacimientos shale gas. Piedecuesta: Instituto Colombiano del Petróleo-Ecopetrol; 2011. 32 p. Informe Técnico.

#### 4.6. FORMAS DE SUPLIR LA DEMANDA DE PROPANTES EN COLOMBIA

En su trabajo de grado Toncel<sup>19</sup> estudió cuatro posibles alternativas de suplir la demanda de propantes en Colombia (tomando la arena como caso de estudio), que se enuncian a continuación:

- Compra de arena importada a las compañías de servicio técnico.
- Compra de arena nacional a las compañías de servicio técnico.
- Compra de arena importada a un intermediario.
- Compra de arena nacional a un intermediario

Estas cuatro opciones se comparan utilizando un criterio de costo presente Equivalente (CPE) con una tasa de descuento del 11,2%. De acuerdo con sus resultados (ver tabla 3), desde el punto de vista financiero la opción más favorable era la compra de arena nacional a las compañías de servicio técnico, con un CPE de \$10.416.949, no obstante desde el punto de vista técnico no es posible llevarla a cabo, dado que en Colombia según algunos estudios realizados no se cuenta con la calidad de material adecuada y la industria productora de arena aún está por desarrollarse. Dado lo anterior la opción más viable corresponde a la compra de arena importada a un intermediario, con un CPE de 11. 068.109.

---

<sup>19</sup> TONCEL HERNÁNDEZ. Op. cit., p. 106-112.

Tabla 3. Comparativo de CPE para las diferentes alternativas

Opción	Descripción	CPE (USD)
1	Compra de arena importada a las compañías de servicio técnico	\$14.974.263
2	Compra de arena nacional a las compañías de servicio técnico	\$10.416.649
3	Compra de arena importada a un intermediario	\$11.068.109
4	Compra de arena nacional a un intermediario	\$12.246.751

**Fuente:** Modificada. Enrique Toncel Hernández. Factibilidad técnica y financiera para la fabricación de material propante, base arena natural, utilizado en el fracturamiento hidráulico en Colombia.

#### 4.7. PROCESO ACTUAL DE SUMINISTRO DE PROPANTES A ECOPETROL

Actualmente el servicio de suministro de propantes a Ecopetrol es prestado por 4 Compañías de servicio técnico (CST) de fracturamiento hidráulico, las cuales son: Weatherford, Halliburton, Schlumberger y Baker. Quienes realizan la intermediación entre el fabricante y la empresa operadora (Ecopetrol). Las CST pueden adquirir el propante directamente con el fabricante o a través de una empresa comercializadora en Colombia.

De los proveedores líderes a nivel mundial según el tipo de propante mostrados en la figura 3, los que tienen mayor participación en Colombia según Castillo y Leal<sup>20</sup> son: Saint Gobain (propantes cerámicos), Santrol (arena frac y propantes recubiertos con resina), Carboceramics (propantes cerámicos y recubiertos con resina) y Curimbaba (propantes cerámicos). Estas compañías le suministran

<sup>20</sup> CASTILLO NÚÑEZ y LEAL HERNÁNDEZ. Op. cit., p. 19.

principalmente a las CST; sin embargo, los productos de Saint Gobain y Texas Silica son comercializados en el país por el Grupo Transmerquim de Colombia S.A.

Si las CST hacen la compra directamente con el fabricante, deben cubrir los costos hasta la base de almacenamiento, mientras que si la compra la realizan a través del Grupo Transmerquim de Colombia S.A, este último cubre el proceso hasta el lugar de almacenamiento destinado por la CST.

Las CST prestan a Ecopetrol el servicio de suministro de propantes así como el alquiler de los equipos, el servicio de fracturamiento hidráulico, las operaciones de bombeo y la movilización.

Ecopetrol incurre en unos costos asociados a lo pactado con las CST, que se describen a continuación:

- Costo de alquiler de los equipos (set de fractura).
- Costo de tener los equipos en stand by, el cual puede ser de dos modalidades, una tarifa fija mensual o una tarifa base que se incrementa ya sea por día adicional y/o bombeo adicional.
- Costo de los propantes de acuerdo al tipo y a la cantidad demandada.
- Costo de movilización de los equipos y los propantes, dependiendo de la cantidad y la distancia desde la base de almacenamiento de la CST y el pozo de Ecopetrol.

Como Ecopetrol actualmente se encuentra en una etapa de desarrollo en campos Shale Play y no cuenta con una estimación 100% exacta de la cantidad de propante que requerirá para las operaciones de fracturamiento hidráulico de los pozos, las CST le permiten devolver el propante que no utilizaron, pero Ecopetrol debe cubrir el costo de moverlo hasta la base de éste.

**4.7.1. Tipo de propante y tamaño.** En Colombia se encuentran disponibles para su uso la arena natural, los cerámicos, recubiertos con resina y la bauxita. Sin embargo, recientemente en las operaciones de fracturamiento hidráulico de algunos pozos no convencionales de Ecopetrol (Coyote-1, Prometeo-1, Casabe 1K, entre otros) se ha venido usando unos propantes específicos de acuerdo a su tipo y tamaño, que le proporciona las características necesarias para soportar los esfuerzos de cierre y mantener abierto el canal conductivo, permitiendo una mayor capacidad de flujo desde el yacimiento hasta la superficie. A continuación se listan estos<sup>21</sup>:

- Sinterblast 60/120 y 70/140.
- Arena malla 100.
- Carbolite 30/50 y 40/70.
- Cerámicos 20/40.

#### **4.8. YACIMIENTO VACA MUERTA- PROVINCIA DE NEUQUÉN-ARGENTINA**

El Instituto de Energía<sup>22</sup> desarrollo un informe en el que estimó los requerimientos logísticos, recursos materiales y humanos del reservorio de Vaca Muerta, en la

---

<sup>21</sup> Información suministrada por Ecopetrol.

<sup>22</sup> INSTITUTO DE ENERGÍA. Requerimientos para el desarrollo del Reservorio de Vaca Muerta (Neuquén/Argentina). Buenos Aires: Academia Nacional de Ingeniería; 2014. 44 p. Documento número 5.

provincia de Neuquén (Argentina) para el periodo 2015-2030 basado en un escenario hipotético de producción de gas y petróleo. Lo anterior con el fin de que dichas necesidades sean previstas y planificadas adecuadamente, de forma que se logre un efectivo aprovechamiento de los recursos de la provincia.

La metodología que usaron consistió en un modelo de análisis espacial de la formación, para estimar la distribución de los pozos y clasificarlos en perfiles tipo. Para el cálculo del número de pozos los primeros años utilizaron como fuente de información los planes públicos de los operadores de Argentina y para los siguientes años proyectaron los resultados teniendo en cuenta las experiencias de 30 operadoras activas durante el 2012 y el 2013 en la formación Eagle Ford en Texas (Estados Unidos), como campo análogo.

Mediante la combinación del perfil tipo y el número de pozos determinaron el número de fracturas por pozo, a partir de las cuales se estimaron las necesidades de insumos totales por año, tales como: agua, agentes de sostén, químicos, potencia de fractura, cemento, entre otros, así como la cantidad de camiones necesarios para transportar estos materiales.

Los resultados obtenidos de acuerdo con el estudio indican que para el 2020 se esperaría perforar 1.260 pozos y 2.200 pozos para el año 2030 (ver figura 6). El número de fracturas por pozo en promedio será de 11 a 16 entre los años 2020 y 2030 (ver figura 7), lo que da como resultado una demanda estimada de arena para fractura por año cercana a los 3'000.000 de toneladas para el 2021 y 7'500.000 de toneladas para el 2030 (ver figura 8).

Figura 6. Evolución de la cantidad de pozos perforados entre los años 2012 a 2030 en el reservorio de Vaca Muerta (argentina).



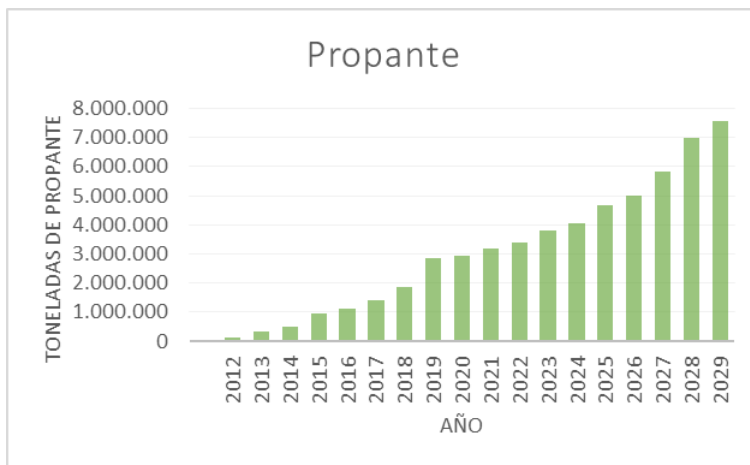
**Fuente:** elaboración propia con datos del trabajo desarrollado por el Instituto de Energía de Argentina.

Figura 7. Evolución del número de etapas de fractura por pozo entre los años 2012 a 2030 en el reservorio de Vaca Muerta (argentina).



**Fuente:** elaboración propia con datos del trabajo desarrollado por el Instituto de Energía de Argentina.

Figura 8. Evolución de los requerimientos de propano para los años 2012 a 2030 en el reservorio de Vaca Muerta (Argentina).



**Fuente:** elaboración propia con datos del trabajo desarrollado por el Instituto de Energía de Argentina.

#### 4.9. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE IGUAL SERVICIO

El proceso metodológico para evaluar, comparar y decidir entre alternativas de proyectos de inversión tiene como punto de partida la caracterización de la situación de análisis, para con base en esto especificar las necesidades de información, elaborar los modelos, enunciar los supuestos, precisar el criterio decisorio y finalmente escoger la herramienta que se adapte a la situación de análisis<sup>23</sup>. Sin

<sup>23</sup> VÁRELA VILLEGAS, Rodrigo. Evaluación económica y comparación de alternativas que producen el mismo servicio. En: Evaluación económica de proyectos de inversión. 7 ed. Bogotá: McGraw-Hill, 2010. p. 114-139.

embargo, es importante resaltar que los buenos resultados de un estudio dependen principalmente de la información base y de los supuestos que el investigador defina.

Las alternativas que producen el mismo servicio son aquellas en las cuales los beneficios producidos son exactamente los mismos, que en el caso de este trabajo hace referencia al suministro de propantes para llevar a cabo las operaciones de fracturamiento hidráulico en yacimientos no convencionales.

Al estudiar alternativas de igual servicio, la comparación se realiza en función de los costos o egresos que genera<sup>24</sup>.

#### **4.10. SIMULACIÓN**

La simulación se puede definir como “una técnica que permite imitar en un ordenador el comportamiento de un sistema real o hipotético según ciertas condiciones particulares de operación”<sup>25</sup>.

**4.10.1. Tipos de simulación.** La simulación por computadora ha tenido un desarrollo considerable en los últimos años, ya que con ella se pretende resolver o comprender una amplia gama de problemas, donde no se cuenta con una solución

---

<sup>24</sup> Ibid., p. 115.

<sup>25</sup> GUASCH Antoni, et al. Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. 2 ed. Barcelona: Edicions UPC, 2003. 351 p.

analítica. A continuación se enumeran los principales tipos de simulación por computadora y sus usos más comunes<sup>26</sup>.

**4.10.1.1 Simulación estática.** Se entiende como la representación de un sistema para un instante particular en el tiempo o bien para representar un sistema en el que el tiempo no es un factor importante, por ejemplo una hoja de Excel con un modelo económico, que puede incluir o no variabilidad.

**4.10.1.2 Simulación continua.** Modelar un sistema en el tiempo, en el cual las variables de estado cambian en forma continua con respecto al tiempo. Típicamente los modelos de simulación continua usan ecuaciones diferenciales que dan la tasa de cambio de las variables en el tiempo<sup>27</sup>. Algunas áreas donde se usa esta técnica son: procesos químicos, comportamientos sociales, problemas matemáticos y físicos.

---

<sup>26</sup> Simulación de eventos discretos como técnica fundamental en la toma de decisiones de alto impacto. [En línea]. VaticGroup. [Citado 30 de enero de 2015]. Disponible en internet <<http://www.vaticgroup.com/perspectiva-logistica/ediciones-anteriores/simulacion-de-eventos-discretos/>>

<sup>27</sup> CURIEL, Mariela J. Simulación. [Diapositivas]. 2006. 16 diapositivas, blanco y negro.

**4.10.1.3 Simulación de eventos discretos.** En este tipo de simulación se generan y administran eventos en el tiempo por medio de una cola de eventos ordenada según el tiempo de simulación en que deben ocurrir y de esta forma el simulador lee de la cola y dispara nuevos eventos. Un evento discreto puede ser: la llegada de un camión, el inicio del proceso de una pieza, la llegada de un cliente, etc.

En general los diferentes tipos de simulación mencionados anteriormente pueden ser clasificados en otros grupos según las características de los parámetros (determinísticos o aleatorios).

## **4.11. FACTORES A CONSIDERAR EN EL DESARROLLO DE UN MODELO DE SIMULACIÓN**

Como la simulación se basa fuertemente en la teoría de probabilidad y estadística, matemáticas, ciencias computacionales, etc., es importante resaltar algunas ideas de como intervienen esas áreas en el desarrollo y formulación del modelo de simulación<sup>28</sup>.

**Generación de variables aleatorias:** si el modelo de simulación presenta un comportamiento estocástico, la simulación debe ser capaz de generar variables aleatorias no-uniformes de distribuciones de probabilidad teóricas o empíricas. Respecto a esto, existe una gran cantidad de generadores para las distribuciones

---

<sup>28</sup> COSS BU, Raúl. Introducción. En: Simulación. Un enfoque práctico. México D.F.: Limusa S.A., 2003. p. 11-18.

de probabilidad más comunes: distribución normal, distribución erlang, distribución exponencial, distribución beta, etc.

**Lenguajes de programación:** después de definir el sistema a modelar y la descripción del sistema en términos de relaciones lógicas de sus variables y diagramas de flujo, es necesario describir el modelo en un lenguaje que sea aceptado por la computadora que se va a usar. En esta etapa se puede desarrollar o comprar el software requerido para la simulación, para esta última es necesario evaluar varios paquetes de simulación.

**Condiciones iniciales:** la mayoría de modelos de simulación de sistemas no terminales se corren en estado estable; sin embargo, algunos de estos modelos presentan en su etapa inicial estados transientes y por consiguiente es importante establecer alternativas para resolver este problema. Algunos autores plantean lo siguiente:

- Usar un tiempo de corrida suficientemente grande de modo que los periodos transientes sean relativamente insignificantes con respecto a la condición de estado estable.
- Excluir una parte inicial de la corrida.
- Utilizar simulación regenerativa.

**Tamaño de muestra:** se refiere al número de corridas en el computador. Se debe seleccionar un tamaño de muestra adecuada para asegurar el nivel de precisión y a la vez minimizar el costo de operación del modelo. El tamaño de la muestra puede ser obtenida de dos maneras:

- Previa e independiente de la operación del modelo.
- Durante la operación del modelo y basado en los resultados arrojados por este.

**Diseño de experimentos:** es un tópico que tiene relevancia en experimentos de simulación. El diseño de experimentos en simulación puede ser de varios tipos, dependiendo de los propósitos específicos que se hayan planteado. Entre los más comunes e importantes se pueden enunciar los siguientes: comparación de las medias y varianzas de las alternativas analizadas, determinación de la importancia y efecto de diferentes variables sobre la simulación y búsqueda de los valores óptimos de un conjunto de variables.

Los pasos involucrados en el desarrollo, diseño experimental y los análisis de la simulación se describen a continuación<sup>29</sup>:

#### 4.11.1. Desarrollo del modelo de simulación

- **Identificar el problema:** enumerar los problemas en un sistema existente.
- **Formular el problema:** seleccionar los límites del sistema, el problema o una parte del mismo, para ser estudiado. Definir el objetivo general del estudio, las medidas de desempeño, decidir el marco de tiempo del estudio (solo una vez o durante un periodo de tiempo), identificar las configuraciones de interés y formular hipótesis sobre el problema. Los problemas deben ser formulados con la mayor precisión.
- **Recoger y procesar los datos del sistema real:** recopilar datos sobre las especificaciones del sistema, variables de entrada, así como del rendimiento del sistema existente. Identificar las fuentes de aleatoriedad del sistema. Seleccionar la distribución de probabilidad correspondiente a cada variable de entrada.

---

<sup>29</sup> ANU, María. Introduction to modeling and simulation. En: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference (7-10, diciembre: Atlanta, Georgia, U.S.A.). Memorias. 1997. p. 7-13.

- **Formular y desarrollar el modelo:** desarrollar esquemas y diagramas de flujo del sistema (cómo fluyen a través del sistema las entidades). Traducir el modelo conceptual a un lenguaje de programación. Verificar que el modelo se ejecuta como lo planeado.
- **Validar el modelo:** comparar el rendimiento del modelo simulado contra el sistema real y realizar pruebas de inferencia estadística.
- **Documentar el modelo para un uso futuro:** documentar detalladamente los objetivos, suposiciones y variables de entrada.

#### 4.11.2. Diseño experimental

- **Seleccionar el diseño experimental apropiado:** seleccione una medida de desempeño, algunas variables de entrada que influyen sobre esta y los niveles de cada variable de entrada. Cuando el número de posibles configuraciones es grande y el modelo de simulación es complejo, se debe optar por las clases de diseño de segundo orden.
- **Establecer condiciones experimentales para la corrida:** obtener la mayor cantidad de información de manera precisa de cada corrida. Determine si el sistema es estacionario (medida de rendimiento no cambia en el tiempo) o es no estacionario (cambios en la medida de rendimiento en el tiempo). Seleccione las condiciones adecuadas de partida. Seleccione la duración del periodo de calentamiento, si es necesario. Decidir el número de corridas independientes, el número de estas debe ser lo suficientemente grande para garantizar la confianza de las estimaciones.
- **Ejecutar las corridas de simulación.**

### 4.11.3. Análisis de simulación

- **Interpretar y presentar los resultados:** calcular medidas numéricas como intervalos de confianza y media de la medida de desempeño deseada para cada configuración de interés.
- **Recomendar un curso de acción:** este puede incluir experimentos para aumentar la precisión, reducir el sesgo de los estimadores, llevar a cabo un análisis de sensibilidad, etc.

## 4.12. GESTIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO DE PROPANTES MEDIANTE SIMULACIÓN

El aumento de los destinos y del volumen de propante demandado, hace que la gestión de su cadena de suministro se convierta en un foco de estudio. Uno de los puntos importantes que contribuyen a un manejo adecuado de esta, tiene que ver con la comprensión de los costos totales asociados a su operación logística. El conocimiento de estos, puede ayudar a los proveedores de servicios y materiales y a los operadores (oferentes y demandantes) a llegar a un acuerdo que los beneficie mutuamente.

La simulación es considerada una herramienta notable a la hora de evaluar cómo los costos totales son afectados cuando los precios de los materiales, los perfiles de transporte y los sitios de perforación varían. Ésta permite estar preparado para dar respuesta y minimizar el riesgo de ocurrencia de estos eventos cambiantes.

Algunas de las tendencias que sobresalen en materia de simulación de la cadena de suministro de propantes son<sup>30</sup>: el **análisis estadístico**, que reconoce y corrige errores estadísticos en los datos; la **programación lineal y teoría de restricciones**, que se encarga de calcular y demostrar el impacto de los factores claves en la estructura de costos asociados al suministro de propantes y obtiene mejores conclusiones sobre valores ideales (optimización); y **simulación por Monte Carlo**, que permite generar simulaciones de múltiples variables que demuestran el impacto en los costos de circunstancias cambiantes y proporciona soluciones aproximadas de lo que puede suceder y la probabilidad de que suceda.

#### 4.13. SIMULACIÓN POR MONTECARLO

El método de Monte Carlo se basa en desarrollar una serie de escenarios aleatorios estructurados, en los cuales se conoce el rango de valores de la variable a través una distribución de probabilidad, pero existe incertidumbre del valor particular que tomaría está en un momento determinado. Este método es válido cuando no se cuenta con información histórica de las variables<sup>31</sup>.

Las operaciones logísticas para el suministro de propantes a pozos no convencionales, están sujetas a fuentes de riesgo e incertidumbre, asociadas principalmente a variables como la necesidad real de propante por pozo, el número

---

<sup>30</sup> MAWET, Pierre J., FLEMING, Alex C. y NICHOLS, John H. Eight leading practices for the proppant supply Chain. En: accenture. 2012. p. 1-20.

<sup>31</sup> HERNÁNDEZ BARROS, Rafael. Metodología financiera de gestión y cuantificación de riesgos de las entidades aseguradoras. En: Pecunia Monográfico. 2011. p. 81-107.

de etapas por pozo, las libras de propante por etapa y la tasa de cambio. La simulación Montecarlo es útil en estos casos, ya que permite identificar y describir las variables logísticas que mayor impacto tienen sobre el costo total mediante el uso de distribuciones de probabilidad, con el fin de obtener mediante múltiples iteraciones el comportamiento estadístico de la variable de salida, que contribuya a tomar una decisión respecto a cuál es la alternativa de menor costo que se adapta a las necesidades actuales de suministro de propantes de Ecopetrol.

Un software basado en simulación Montecarlo, es @Risk de palisade, que trabaja como un complemento de Microsoft Excel con sofisticadas funciones en la especificación y ejecución de modelos de simulación, que permite analizar cientos de escenarios al mismo tiempo, con el propósito de contribuir a la toma de decisiones<sup>32</sup>.

#### **4.14. DISTRIBUCIONES DE PROBABILIDAD**

“Una distribución de probabilidad de una variable aleatoria  $X$  es una descripción del conjunto de valores posibles de  $X$ , junto con la probabilidad asociada con cada uno de estos valores”<sup>33</sup>. Las formas de las distribuciones de probabilidad varían de

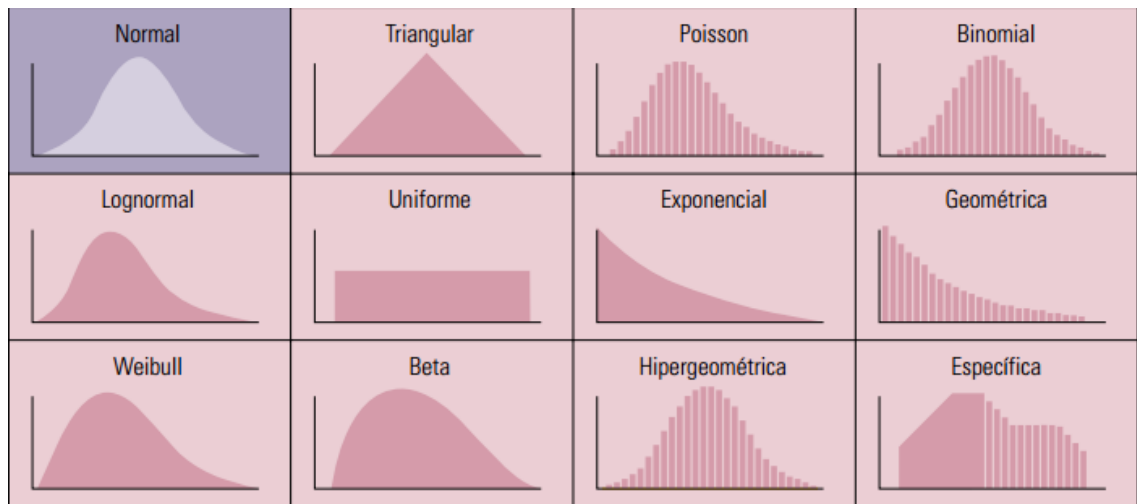
---

<sup>32</sup> PALISADE CORPORATION. Guía para el uso de @Risk. Programa de complemento para el análisis y simulación de riesgos en Microsoft Excel. New York: Palisade Corporation; 2013. Versión 6.

<sup>33</sup> MONTGOMERY, Douglas C. y RUNGER, George C. Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería. McGraw-Hill, año. p. 103.

acuerdo al comportamiento de los datos de la variable. En la figura 9 se pueden observar las funciones de probabilidad más conocidas.

Figura 9. Principales distribuciones de probabilidad



**Fuente:** William Bailey, et al. Riesgos medidos.

#### 4.15. PRUEBAS DE BONDAD DE AJUSTE

Las variables de entrada de un modelo que tienen un comportamiento aleatorio, son muestreadas con el objetivo de determinar a través de una prueba de bondad de ajuste la distribución de probabilidad que mejor representa a los datos<sup>34</sup>.

La prueba de bondad de ajuste compara la distribución de frecuencias observadas ( $F_o$ ) de una variable con la distribución de frecuencias esperadas ( $F_e$ ) de la misma variable medida en un grupo de referencia. El propósito de estas pruebas es averiguar si existen diferencias significativas entre la distribución observada y la distribución esperada<sup>35</sup>.

Entre las pruebas de bondad de ajuste se puede decir que las más conocidas son: prueba de Chi cuadrado ( $X^2$ ), prueba de Kolmogorov Smirnov y prueba de Anderson Darling.

La **prueba Chi cuadrado** es una prueba general que se utiliza para verificar el ajuste de una serie de datos a una distribución teórica de probabilidad. El valor del estadístico chi-cuadrado mide la diferencia entre las  $F_o$  y las  $F_e$ ; cuanto más grande sea su valor, mayor es la diferencia entre la realidad observada y el modelo teórico,

---

<sup>34</sup> MÁRQUEZ FERNÁNDEZ, Carlos A. [En línea]. Pruebas de bondad de ajuste. [Notas de clase]. [Citado 20 de septiembre de 2015]. Disponible en internet <<https://carlosmarquez.files.wordpress.com/2012/02/prueba-de-bondad-de-ajuste.pdf>>

<sup>35</sup> MORA GUTIERREZ, Luis A. Mantenimiento estratégico para empresas de servicios y/o industriales. AMG. Colombia. 2008.

mientras que si este valor es pequeño, mejor es el ajuste de los datos a la distribución teórica<sup>36</sup>.

La **prueba de Kolmogorov Smirnov** es una alternativa para identificar si una muestra de datos proviene de una distribución específica. Esta prueba se basa en la comparación entre la función de distribución acumulada de una distribución teórica con la distribución acumulada de la muestra.

La **prueba de Anderson Darling**, se caracteriza por ser más potente que la prueba Chi cuadrado y la de Kolmogorov-Smirnov. Lo anterior dado que la prueba  $X^2$  trabaja con datos agrupados lo cual ocasiona cierta pérdida de información y que la prueba Kolmogorov Smirnov es menos sensible a desajustes en las colas de la distribución. En particular, la prueba Anderson Darling funciona mejor cuando hay datos atípicos<sup>37</sup>.

#### 4.16. NÚMERO DE ITERACIONES

El número de iteraciones hace referencia a la cantidad de simulaciones necesarias para encontrar resultados estadísticamente confiables. Para determinar el número de iteraciones de la simulación, se debe efectuar el cálculo de la varianza de un cierto número de iteraciones (premuestra), para esto se parte del supuesto que la

---

<sup>36</sup> ARVELO LUJAN, Ángel F. Pruebas de ajuste a la normal. EN: La capacidad de los procesos industriales. Métodos estadísticos exigidos por las normas ISO 9000. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello, 1998. p. 26-58.

<sup>37</sup> MARQUES DOS SANTOS, María José. Datos de Frecuencia. EN: Estadística Básica. Un enfoque no paramétrico. México D.F.: UNAM, 2001. p. 31-56.

distribución de esa probabilidad es normal; se define un nivel de confianza y con base en esta cifra se halla el valor Z de la distribución normal. Además también debe determinarse el error que se está dispuesto a aceptar. La fórmula<sup>38</sup> se presenta a continuación:

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 \sigma^2}{e^2} \quad (1)$$

Donde,

n= número de iteraciones.

$Z_{\alpha/2}$ = estadístico de distribución normal.

$\alpha$ = nivel de confianza (usualmente se usa el 5%).

$\sigma$ =desviación estándar de la premuestra.

e=error absoluto de estimación, depende del investigador.

#### **4.17. ANÁLISIS DE VARIANZA DE UN FACTOR**

El análisis de varianza (ANOVA) es una prueba estadística para examinar si más de dos grupos difieren significativamente entre sí en cuanto a sus medias y varianzas. Es una generalización de la prueba t para dos muestras independientes. Este test permite contrastar la hipótesis nula de que las medias de las k ( $k > 2$ )

---

<sup>38</sup> JIMÉNEZ BOULANGER, Francisco; ESPINOZA GUTIÉRREZ, Carlos L. y FONSECA RETANA, Leonel. La estandarización. EN: Ingeniería económica. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2007. p. 173.

poblaciones no difieren significativamente, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de las poblaciones difiere significativamente en cuanto a su valor esperado. La variable independiente o factor es la variable categórica que define los grupos que se van a comparar y la variable dependiente es la variable cuantitativa en la que deseamos comparar los grupos<sup>39</sup>.

El parámetro que indica si las medias de las muestras experimentales son iguales o diferentes es el nivel de significación entre grupos, obtenido de la comparación entre el estadístico  $F$  calculado y tabulado que se distribuye según el modelo de probabilidad  $F$  de *Fisher-Snedecor*. Si se ha elegido un nivel de significancia  $\alpha$ , aceptaremos que las medias son diferentes cuando el nivel de significación sea menor que  $\alpha$ . Este nivel de significancia se debe fijar a priori<sup>40</sup>.

---

<sup>39</sup> HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Análisis paramétricos. EN: Metodología de la investigación. 6 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2014. p. 304-315.

<sup>40</sup> SERRANO GALLEGO, Roque. Introducción al análisis de datos experimentales. Tratamiento de datos en bioensayos. Castellón de la Plana: Universitat Jaume I, 2003. 32 p. (Colección ciencias experimentales; no. 4). ISBN 84-8021-429-5.

## 5. METODOLOGÍA

Para determinar la alternativa de suministro de propante para un área de explotación no convencional que minimice los costos logísticos asociados a ésta, se desarrollará una metodología basada en evaluación de alternativas de igual servicio, cuyo criterio decisorio es el mínimo costo. Además, teniendo en cuenta que algunas variables tienen un comportamiento aleatorio se utiliza una herramienta de simulación para evaluar las diferentes alternativas. La metodología se estructura en las siguientes etapas:

### 5.1. ETAPA 1

**Definir las alternativas y las respectivas variables y parámetros a tener en cuenta para su evaluación.**

**Alternativa 1:** Evaluar el suministro de agentes de sostén a partir de una Compañía de Servicio Técnico, que cubra el costo del propante, el almacenamiento, la administración y el bombeo. Mediante la ecuación (2) se estimará el costo total anual de esta alternativa (los parámetros de la ecuación se definen en la tabla 4).

$$C_1 = (CU_{c\acute{o}a} * NE * NL * NP) + CTN + CTD \quad (2)$$

**Alternativa 2:** Evaluar la opción de comprar a un intermediario importador del producto en Colombia. Esta alternativa se llevaría a cabo a través del grupo

Transmerquim de Colombia que hasta el momento ha actuado como intermediario entre el fabricante y la CST, pero están en capacidad de vender el apuntalante a Ecopetrol. Esta opción cubre el costo desde el fabricante en China (en el caso de este estudio), Estados Unidos de América, Brasil, entre otros, incluyendo los trámites de importación. Ecopetrol cubre los costos asociados al transporte nacional, mantenimiento y administración del inventario de apuntalante y por último el bombeo en pozo. De esta alternativa se derivan dos opciones, que estarían dadas si el propante es almacenado por Ecopetrol o por Transmerquim en su base en Barrancabermeja (Ecopetrol se ahorraría los costos de almacenamiento, mantenimiento y administración del inventario). Mediante la ecuación (3) se estimará el costo total anual de esta alternativa.

$$C_2 = (CU_{Ic\acute{o}a} * NE * NL * NP) + CB + CTN + CI + CA \quad (3)$$

**Alternativa 3:** Evaluar la opción de que la empresa operadora realice la importación directamente con los fabricantes desde China hasta el pozo en situ (no se pudo evaluar fabricantes en otro país dada la escasa disponibilidad de datos proporcionados por estas). En este caso Ecopetrol se ocuparía de todos los costos asociados al proceso de importación desde que se lo entregan en puerto chino hasta que lo nacionaliza en Colombia, así como los costos relacionados con el transporte nacional, el almacenamiento, el mantenimiento, la administración del inventario de propante y el bombeo. Mediante la ecuación (4) se estimará el costo total anual de esta alternativa.

$$C_3 = (CU_{FOBc\acute{o}a} * NE * NL * NP) + CB + CTN + CTI + COP + CI + CA \quad (4)$$

En la tabla 4 se describen las variables aleatorias y los parámetros utilizados en las ecuaciones 2, 3 y 4, estableciendo en la columna tipo su respectiva condición, probabilístico (P) o determinístico (D).

Tabla 4. Variables de las alternativas seleccionadas

<b>Variable</b>	<b>Definición</b>	<b>Tipo</b>
CU <sub>c</sub> ; CU <sub>a</sub>	Costo unitario por libra de propante ofrecido por la CST (arena y cerámico).	P
CU <sub>IC</sub> ; CU <sub>Ia</sub>	Costo unitario por libra de propante ofrecido por el Intermediario (arena y cerámico).	P
CU <sub>FOB-c</sub> ; CU <sub>FOB-a</sub>	Costo unitario por libra Free on Board en China (arena y cerámico).	P
NE	Número de etapas por pozo.	P
NL	Número de libras consumidas por etapa.	P
NP	Número de pozos a explotar por año.	D
CTN	Costo de transporte terrestre en Colombia.	D
CTD	Costo de transporte terrestre en Colombia por devolución, este costo se presenta cuando la empresa explotadora de petróleo debe regresar propante a la CST, debido a un exceso de pedido.	D
CB	Costo total por bombeo. Su cálculo integra el costo por bombeo por etapa y el costo por el set de bombeo por pozo.	D
CI	Costo de mantener inventario.	D
CA	Costo administrativo. Se calcula a través de la suma de los costos correspondientes a almacenamiento en bodega en Barrancabermeja, vigilancia, administrador de la bodega, operario de montacargas, montacargas y transporte desde la bodega al pozo.	D
CTI	Costo de transporte desde el Puerto en China hasta el puerto en Colombia.	D
COP	Costo de operaciones portuarias en Colombia. Este cálculo incluye los costos asociados a seguro de mercancía, preparación de documentos, autorización de aduana y control técnico, manejo en terminal y gravamen arancelario.	D

Probabilístico (P); Determinístico (D). Adicional a las anteriores 16 variables se toma la tasa de cambio del peso frente al dólar, que es utilizada en la mayoría de las variables determinísticas.

## 5.2. ETAPA 2

Especificar los datos determinísticos y probabilísticos de las variables de entrada a partir de datos proyectados de un área con características similares al área a explotar, cotizaciones de proveedores, juicio de expertos, artículos e informes técnicos.

A continuación se expone el origen de los datos utilizados en las diferentes variables y parámetros de las tres alternativas planteadas.

**5.2.1. Variables aleatorias.** En la tabla 5 se presenta un resumen de las nueve variables aleatorias junto con la distribución de probabilidad teórica que mejor describe su comportamiento, los parámetros asociados a cada una de las distribuciones y la fuente de donde se obtuvieron los datos.

Tabla 5. Distribución de probabilidad de las variables de entrada

Variable	Descripción	Gráfico	Distribución	Parámetros	Fuente
Variable 1	Costo propante por libra tipo arena (CST)		Normal	$\mu=0,6;$ $\sigma=0.0067$	Media por juicio de expertos y desviación estándar por variabilidad de los datos de arena de Transmerquim.

Tabla 5. (Continuación)

Variable	Descripción	Gráfico	Distribución	Parámetros	Fuente
Variable 2	Costo propante por libra tipo cerámico (CST)	<p>Comparación de ajuste para Costo Cerámico CST RiskNormal(1,095;0,12426...)</p> <p>Versión de curso de @RISK Universidad Industrial de Santander</p>	Normal	$\mu=1,095$ ; $\sigma=0,12426$	Informe Técnico (Castillo Núñez & Hernández Leal, 2011, pág. 24)
Variable 3	Costo propante por libra tipo arena (Transmerquim)	<p>Costo Arena Transmerq... 0,38911 0,41089</p> <p>Versión de curso de @RISK Universidad Industrial de Santander</p>	Normal	$\mu=0,4$ ; $\sigma=0,0067$	Juicio de Expertos
Variable 4	Costo propante por libra tipo cerámico (Transmerquim)	<p>Costo Cerámico Transmerq... 0,597 1,003</p> <p>Versión de curso de @RISK Universidad Industrial de Santander</p>	Normal	$\mu=0,8$ ; $\sigma=0,12426$	Media por juicio de expertos y desviación estándar por variabilidad de los datos de cerámicos de la CST.
Variable 5	Costo propante por libra tipo arena (Importación China)	<p>Comparación de ajuste para Costo Arena Ch... RiskNormal(0,148929;0,054463...)</p> <p>Versión de curso de @RISK Universidad Industrial de Santander</p>	Normal	$\mu=0,148929$ ; $\sigma=0,054463$	Catálogo de productos de los proveedores en China (Alibaba Group)
Variable 6	Costo propante por libra tipo cerámico (Importación China)	<p>Comparación de ajuste para Costo Cerámicos China RiskNormal(0,203225;0,053335...)</p> <p>Versión de curso de @RISK Universidad Industrial de Santander</p>	Normal	$\mu=0,203225$ ; $\sigma=0,053335$	Catálogo de productos de los proveedores en China (Alibaba Group)
Variable 7	Número de etapas por pozo.	<p>Número de Etapas(p... RiskUniforme(4;16;0,000000...)</p> <p>Versión de curso de @RISK Universidad Industrial de Santander</p>	Uniforme Discreta	Min=4; Máx=16	Reservorio de Vaca Muerta (Instituto de Energía, 2014)

Tabla 5. (Continuación)

Variable	Descripción	Gráfico	Distribución	Parámetros	Fuente
Variable 8	Número de libras de propante por etapa.		Lognorm	$\mu=482747,1$ ; $\sigma=25039,8$	Reservorio de Vaca Muerta de (Instituto de Energía, 2014)
Variable 9	Precio del dólar en el último año.		Normal	$\mu=2408,91$ ; $\sigma=277,54$	Publicados en el último año por el Banco de la Republica.

Elaborado con el software @Risk. Datos ajustados con el estadístico Anderson-Darling.

Considerando que algunas distribuciones de las variables aleatorias pueden tomar valores negativos, se hizo necesario establecer límites de truncamiento para evitar resultados inconsistentes con el objetivo de esta investigación. Estos límites se establecieron multiplicando la media de la distribución más tres desviaciones estándar (límite superior) y menos tres desviaciones estándar (límite inferior), esto considerando que de acuerdo con el teorema de Chebyshev el porcentaje de los datos que debe caer dentro de 3 desviaciones estándar para una distribución en forma de campana es alrededor de 99,7%<sup>41</sup>.

<sup>41</sup> Freund, J. E., & Simon, G. A. (1994). Estadística Elemental. Naucalpan de Juárez: Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.

**5.2.2. Parámetros.** En la tabla 6 se realiza una descripción de las variables determinísticas, sus componentes, los valores asociados a cada componente y la fuente de donde se obtuvo la información.

Tabla 6. Valores asociados a las variables determinísticas de entrada

Variable	Descripción	Componentes	Valor	Fuente
Variable 10	Número de pozos a explotar por año.	N/A	10; 30; 50; 70 y 100.	Juicio de expertos
Variable 11	Costo de transporte terrestre nacional.	Bogotá-Barrancabermeja	74.371 COP/ton	(Nodo Logístico, 2010)
		Cartagena-Barrancabermeja	110.386 COP/ton	
Variable 12	Costo de transporte terrestre nacional por devolución.	Barrancabermeja-Bogotá	74.371 COP/ton	
Variable 13	Costo total por bombeo.	Costo por bombeo por etapa	3.000 USD	(Sáchica & Amaya, 2010)
		Costo por el set de bombeo por pozo	8.000 USD	
Variable 14	Costo de mantener en inventario. Se estima sobre el valor del pedido medio.	Costo financiero	12%	Ecopetrol S.A. <sup>42</sup>
Variable 15	Costo administrativo.	Arrendamiento de bodega en Barrancabermeja (mensual)	11.523 COP/m <sup>2</sup>	Precio de mercado de arrendamiento de bodegas en la zona
		Vigilancia por turno (mensual)	2.079.102,67 COP	(Superintendencia de Vigilancia y Seguridad Privada, 2014)

<sup>42</sup> Serrano, D. (2011). Factibilidad técnica y económica del uso de propantes ultralivianos en el fracturamiento hidráulico de pozos: Aplicación en un campo colombiano. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Pág. 99.

Tabla 6. (Continuación)

Variable	Descripción	Componentes	Valor	Fuente
Variable 15	Costo administrativo.	Administrador de la bodega (mensual)	2.317.709 COP	(Ecopetrol S.A., 2013) <sup>43</sup>
		Coordinador de compras importación (mensual)	2.500.000 COP	(Tusalario.org, 2015)
		Operario de montacargas (mensual)	700.000 COP	(Buscojobs, 2015)
		Montacargas	25.000 USD	(Ningbo Tiansheng Forklift, 2015)
		Transporte al pozo	22,22 COP/ton	Expertos
Variable 16	Costo de transporte internacional (desde el Puerto en China hasta el puerto en Colombia).	Contenedor de 20 ft	1170 USD	(Proexport Colombia, 2013)
Variable 17	Costo de operaciones portuarias en Colombia.	Seguro de mercancías (sobre el valor de la carga)	1%	(Grupo ISCE, 2015) <sup>44</sup>
		Preparación de documentos	250	(Grupo Banco Mundial, 2013) pág. 149
		Autorización de aduana y control técnico	170	
		Puertos y manejo en terminal	150	
		Gravamen arancelario	5%	(Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales, 2015) <sup>45</sup>

<sup>43</sup> Se tomó el salario básico de un técnico administrativo III y se ajustó por inflación para los años siguientes.

<sup>44</sup> El seguro es de 0.65% según la fuente, pero se reajusto teniendo en cuenta los riesgos que tiene la carga en carreteras Colombianas.

<sup>45</sup> Código Nomenclatura: 2505.10.00.00 Arenas naturales de cualquier clase.

### 5.3. ETAPA 3

**Evaluación de cada una de las alternativas mediante simulación por Monte Carlo (software @Risk), tanto para propante tipo arena como cerámico.**

Para ejecutar la simulación se consideraron diferentes niveles de producción anuales (10; 30; 50; 70 y 100) tanto para los propantes tipo arena como cerámicos. Además se planteó un descuento por volumen de compra de propante, el cual se presenta en la tabla 7.

Tabla 7. Descuento por volumen de compra de propante

Rango en libras		Descuento (%)
Min.	Máy.	
44.092.452	110.231.131	2
110.231.131	176.369.810	2,5
176.369.810	286.600.941	3
286.600.941	352.739.619	4
352.739.619	>	5

**Fuente:** Organización OPL Carga.

## 6. APLICACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. NÚMERO DE ITERACIONES

Para hallar el número de iteraciones adecuado para la simulación, se hizo una corrida preliminar de 1000 para cada una de las alternativas, de la que se obtuvo determinados valores de media ( $\mu$ ) y desviación estándar ( $\sigma$ ), los cuales se reemplazaron en la ecuación 1 (descrita en el marco teórico) considerando un error del 1% y un  $z_{\alpha/2} = 1.96$  para un nivel de significancia  $\alpha=5\%$ . Los resultados se presentan a continuación:

#### Alternativa 1

$$\mu = 29.667.398,64$$

$$\sigma = 11.246.333,57$$

$$n = \frac{(1,96)^2(11.246.333,57)^2}{(0,01 * 29.667.398,64)^2} = 5521$$

#### Alternativa 2

$$\mu = 20.301.946,53$$

$$\sigma = 7.443.476,09$$

$$n = \frac{(1,96)^2(7.443.476,09)^2}{(0,01 * 20.301.946,53)^2} = 5164$$

### **Alternativa 3**

$$\mu = 10.109.691,65$$

$$\sigma = 4.236.024,80$$

$$n = \frac{(1,96)^2(4.236.024,80)^2}{(0,01 * 10.109.691,65)^2} = 6745$$

Teniendo en cuenta los resultados del número de iteraciones para cada alternativa, se decidió llevar a cabo 10.000 iteraciones, dado que el tiempo adicional de corrida del software es mínimo y los resultados de la simulación son similares.

## **6.2. RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN**

En las tablas 8, 9 y 10 se presentan las estructuras de costo propuestas para simular las tres alternativas de suministro de propantes. Los resultados presentados en cada una de las tablas son anuales y corresponden a ejecutar una corrida de simulación para un nivel de producción de diez pozos. Para los niveles de producción restantes las estructuras de costos se encuentran en el anexo A.

En la **tabla 8** se estiman los tres costos más notables, que corresponden a: costo del propante requerido estimado a partir de las variables cantidad (lb) y costo de propante por libra; costo por transporte; y el costo por devolución que se estima a partir de la probabilidad de ocurrencia de un consumo inferior al estimado inicialmente. Al realizar un análisis vertical de cada uno de los costos, se observa que el más relevante es el costo del propante requerido con un 98,731% y un 97,674% para cerámico y arena respectivamente, mientras que el costo por devolución es prácticamente nulo.

Tabla 8. Estructura de costos mediante una CST (alternativa 1)

Ítem	Cerámico	%	Arena	%
Cantidad de propante por etapa (Lb)	482.747,10		482.747,10	
No. de etapas de Frac/Pozo	10		10	
Cantidad de propante Requerido (Lb/Pozo)	4'827.471		4'827.471	
Costo de propante (USD/Lb)	1,1		0,6	
Costo total de propante por pozo (USD)	5'291.657,39		2'896.482,60	
No. de Pozos	10		10	
Total Cantidad de Propante Requerido (Lb)	48'274.710		48'274.710	
<b>Costo del Propante Requerido (USD)</b>	<b>51'858.242</b>	<b>98,713</b>	<b>28'385.529</b>	<b>97,674</b>
Total Cantidad de Propante Requerido (ton)	21'897,04		21'897,04	
Costo Viaje Bogotá-Barranca (USD/ton)	30,87		30,87	
<b>Costo por Transporte (USD)</b>	<b>676.034</b>	<b>1,287</b>	<b>676.034</b>	<b>2,326</b>
Cantidad de propante devuelto (ton)	0,58		0,58	
<b>Costo por Devolución (USD)</b>	<b>18</b>	<b>0,00003</b>	<b>18</b>	<b>0,0001</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL (USD)</b>	<b>52'534.294,09</b>	<b>100</b>	<b>29'061.581,13</b>	<b>100</b>

La diferencia en unidades de toneladas y libras se debe a que el costo unitario suministrado por el respectivo proveedor así lo exige. Una tonelada equivale a 2204,62 libras.

Es importante destacar que el costo del propante por libra en la **tabla 8** incluye los costos por bombeo, administración e inventario, por tanto en la **tabla 9** estos se incluyen como marginales complementado su estructura. Adicional a lo anterior, se presenta el costo total considerando que el intermediario entrega el producto en su base en Barrancabermeja, mediante el cual Ecopetrol se ahorraría los costos por transporte, administración e inventario. En el análisis vertical se observa que

considerando la opción de almacenar o no el costo más representativo es el del propante requerido, mientras que el costo de menor porcentaje de participación es el transporte al pozo y el de inventario para la opción sin almacenamiento y con almacenamiento respectivamente.

Tabla 9. Estructura de costos mediante un intermediario (alternativa 2)

Ítem		Cerámico	%	Arena	%
Cantidad de propante por etapa (Lb)		482.747		482.747	
No. de etapas de Frac/Pozo		10		10	
Cantidad de propante Requerido (Lb/Pozo)		4'827.471		4'827.471	
Costo de Propante (USD/Lb)		0,8		0,4	
Costo total de propante por pozo (USD)		3'861.977		1'930.988	
No. de Pozos		10		10	
Total Cantidad de Propante Requerido (Lb)		48'274.710		48'274.710	
<b>Costo del Propante Requerido (USD)</b>		<b>37'461.175</b>	<b>98,47/96,302</b>	<b>18'730.587</b>	<b>96,99/93,091</b>
Total Cantidad de Propante Requerido (ton)		21'897,04		21'897,04	
Costo Viaje Bogotá-Barranca (USD/ton)		30,87		30,87	
<b>Costo por Transporte (USD)</b>		<b>676.034</b>	<b>0/1,738</b>	<b>676.034</b>	<b>0/3,360</b>
Costo por bombeo/etapa (USD)	3.000	300.000		300.000	
Costo por Set de bombeo/pozo (USD)	8.000	80.000		80.000	
<b>Costo por Bombeo (USD)</b>		<b>380.000</b>	<b>1,00/0,977</b>	<b>380.000</b>	<b>1,97/1,889</b>
Tamaño de pedido cada 15 días (ton)		912,4		912,4	
Arrendamiento bodega (USD)		35.155,8		35.155,8	
Vigilancia (turnos) (USD)	3	31.071		31.071	
Administrador de la bodega (USD)	1	11.546		11.546	
Operario de montacargas (USD)	1	3.487		3.487	
Montacargas (USD)	1	2.500		2.500	
<b>Transporte al pozo (USD)</b>		<b>202.000</b>	<b>0,53/0</b>	<b>202.000</b>	<b>1,05/0</b>
<b>Costo Administrativo (USD)</b>		<b>285.760,14</b>	<b>0/0,735</b>	<b>285.760,14</b>	<b>0/1,42</b>
Costo financiero (USD)	12%	96.549,4		48.274,7	
<b>Costo por Inventario (USD)</b>		<b>96.549,42</b>	<b>0/0,248</b>	<b>48.274,71</b>	<b>0/0,24</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL SIN ALMACENAMIENTO(USD)</b>		<b>38'043.175,40</b>	<b>100</b>	<b>19'312.587,92</b>	<b>100</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL CON ALMACENAMIENTO(USD)</b>		<b>38'899.518,39</b>	<b>100</b>	<b>20'120.656,20</b>	<b>100</b>

El símbolo “/” separa el porcentaje de participación de la opción sin y con almacenamiento. La diferencia en unidades de toneladas y libras se debe a que el costo unitario suministrado por el respectivo proveedor así lo exige. Una tonelada equivale a 2204,62 libras.

En la **tabla 10** se estiman principalmente los costos de propante requerido, transporte terrestre, bombeo, administración, inventario y operaciones portuarias que componen la opción de que la empresa explotadora realice el proceso de

suministro directamente. De acuerdo con el análisis vertical, se resalta que los costos más sobresalientes son los causados por el propante requerido, las operaciones portuarias y el transporte terrestre, alcanzando un porcentaje entre los tres del 94,52 y el 93,04 para apuntalante cerámico y arena respectivamente; asimismo se observa que el costo por inventario es el menos representativo de todos.

Tabla 10. Estructura de costos mediante importación directa (alternativa 3)

Item		Cerámico	%	Arena	%
Cantidad de propante por etapa (Lb)		482.747		482.747	
No. De etapas de Frac/Pozo Horizontal		10		10	
Cantidad de propante Requerido (Lb/Pozo)		4'827.471		4'827.471	
Costo de Propante FOB (USD/Lb)		0,21		0,15	
Costo total de propante por pozo (USD)		1'008.031		732.637	
No. De Pozos		10		10	
Total Cantidad de Propante Requerido (Lb)		48'274.710		48'274.710	
<b>Costo del Propante Requerido (USD)</b>		<b>9'777.900</b>	<b>76,14</b>	<b>7'106.577</b>	<b>71,04</b>
Total Cantidad de Propante Requerido (ton)		21'897,04		21'897,04	
Costo Viaje Cartagena-Barranca (USD/ton)		45,82		45,82	
<b>Costo por Transporte (USD)</b>		<b>1'003.411</b>	<b>7,81</b>	<b>1'003.411</b>	<b>10,03</b>
Costo por bombeo/etapa (USD)	3.000	300.000		300.000	
Costo por Set de bombeo/pozo (USD)	8.000	80.000		80.000	
<b>Costo por Bombeo (USD)</b>		<b>380.000</b>	<b>2,96</b>	<b>380.000</b>	<b>3,80</b>
Tamaño de pedido (ton) cada 15 días		912,4		912,4	
Arrendamiento bodega (USD)		35.155,8		35.155,8	
Vigilancia (turnos) (USD)	3	31.071		31.071	
Administrador de la bodega (USD)	1	11.546		11.546	
Coordinación de compras e importación (USD)	1	12.454		12.454	
Operario de montacargas (USD)	1	3.487		3.487	
Montacargas (USD)	1	2.500		2.500	
Transporte al pozo (USD)		202.000		202.000	
<b>Costo Administrativo (USD)</b>		<b>298.213,90</b>	<b>2,32</b>	<b>298.213,90</b>	<b>2,98</b>
Costo financiero (USD)	12%	25.200,8		18.315,9	
<b>Costo por Inventario (USD)</b>		<b>25.200,77</b>	<b>0,20</b>	<b>18.315,92</b>	<b>0,18</b>
Transporte principal Barco China-Colombia					
Contenedor de 20' (USD)	1170	517.995		517.995	
Seguro de mercancías (USD)	1%	97.779		71.066	
Preparación de documentos (USD)	250	110.683		110.683	
Autorización de aduana y control técnico (USD)	170	75.264		75.264	
Puertos y manejo terminal (USD)	150	66.410		66.410	
Gravamen arancelario (USD)	5%	488.895,0		355.328,9	
<b>Costo de Operaciones Portuarias (USD)</b>		<b>1'357.025,04</b>	<b>10,57</b>	<b>1'196.745,69</b>	<b>11,96</b>
<b>COSTO TOTAL ANUAL (USD)</b>		<b>12'841.750,44</b>	<b>100</b>	<b>10'003.264</b>	<b>100</b>

La diferencia en unidades de toneladas y libras se debe a que el costo unitario suministrado por el respectivo proveedor así lo exige. Una tonelada equivale a 2204,62 libras.

Teniendo en cuenta que los costos totales de la alternativa 2 con y sin almacenamiento son muy similares, se decidió realizar la simulación con la alternativa 2 sin almacenamiento. Los resultados de la media, desviación estándar e intervalos a un nivel de confianza del 90% (IC) de las corridas del modelo para las tres alternativas planteadas se presentan en la **tabla 11**. Adicionalmente en la **figura 10** y **11** se exponen las gráficas de la media y la desviación estándar.

Tabla 11. Resultados simulación

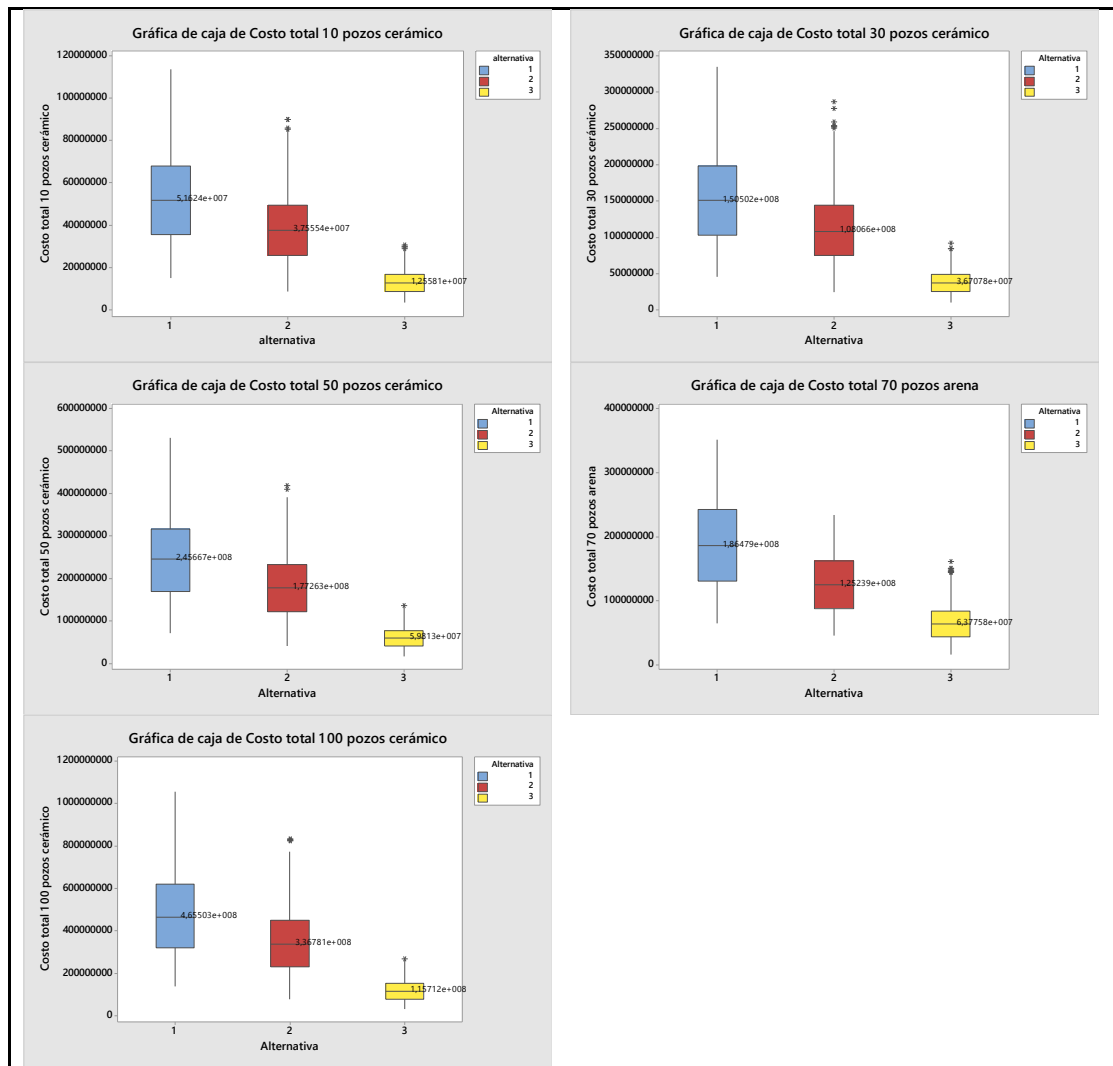
N° de pozos	Estadístico	CST		INTERMEDIARIO		IMPORTACIÓN DIRECTA	
		Cerámico	Arena	Cerámico	Arena	Cerámico	Arena
10 pozos	Media	52.454.771,7	29.029.410,4	38.368.954,2	19.475.943,6	12.939.490,5	10.083.877,5
	Desv. Est	20.198.476,6	10.689.764,3	15.398.501,2	7.147.888,7	5.152.977,2	4.167.460,7
	IC 90%	22.135.610,0	12.068.000,0	15.791.500,0	8.140.950,0	5.402.147,0	4.043.574,0
		86.167.560,0	45.795.960,0	64.715.420,0	30.758.440,0	21.873.730,0	17.587.670,0
30 pozos	Media	152.001.964,1	84.131.812,5	111.142.479,5	56.455.234,2	37.626.004,7	29.366.792,0
	Desv. Est	58.128.087,4	30.746.103,9	44.230.689,8	20.555.516,7	14.985.675,5	12.216.036,9
	IC 90%	63.401.950,0	35.151.330,0	45.996.020,0	23.723.760,0	15.610.140,0	11.903.670,0
		247.985.100,0	132.088.800,0	187.427.800,0	88.540.460,0	63.362.390,0	50.944.370,0
50 pozos	Media	245.260.304,4	135.856.654,5	179.449.643,0	91.170.497,1	60.739.800,6	47.477.232,9
	Desv. Est	90.651.943,7	48.029.585,4	69.324.192,1	32.090.658,3	23.464.407,9	19.135.859,2
	IC 90%	106.487.200,0	58.987.800,0	76.190.120,0	39.785.730,0	26.047.090,0	19.524.670,0
		392.152.100,0	207.841.900,0	293.677.600,0	139.405.600,0	101.269.400,0	81.532.980,0
70 pozos	Media	336.773.550,8	186.500.473,9	246.454.865,0	125.197.040,0	83.873.287,1	65.532.867,3
	Desv. Est	126.450.847,2	66.726.397,3	96.673.072,6	44.633.326,3	33.072.374,4	26.569.484,3
	IC 90%	145.260.700,0	80.210.740,0	104.160.200,0	54.110.910,0	35.782.810,0	27.319.020,0
		549.710.700,0	292.557.900,0	412.692.100,0	195.537.000,0	143.166.700,0	113.516.600,0
100 pozos	Media	476.076.424,7	263.639.636,3	348.003.852,6	176.968.884,1	118.933.266,4	93.085.360,2
	Desv. Est	183.761.394,9	97.212.146,6	139.667.126,2	64.962.135,2	47.831.763,1	38.859.761,9
	IC 90%	204.279.000,0	112.321.900,0	146.608.500,0	75.842.660,0	50.226.250,0	38.051.810,0
		784.623.400,0	416.596.000,0	589.319.900,0	279.850.000,0	202.794.300,0	162.278.400,0

Fuente: Resultados del software @Risk.

En la **tabla 11** se evidencia que los intervalos de confianza se traslapan; sin embargo después de realizar una prueba ANOVA (análisis de varianza) para contrastar la hipótesis nula de que las medias de las tres alternativas son iguales, frente a la hipótesis alternativa de que por lo menos una de las medias de las tres alternativas es diferente, se halló que las diferencias entre las medias de las

alternativas es significativa, lo que indica que existe gran variabilidad entre las opciones de suministro de propantes planteadas.

Figura 10. Gráficas de caja de Costo total para propante tipo cerámico

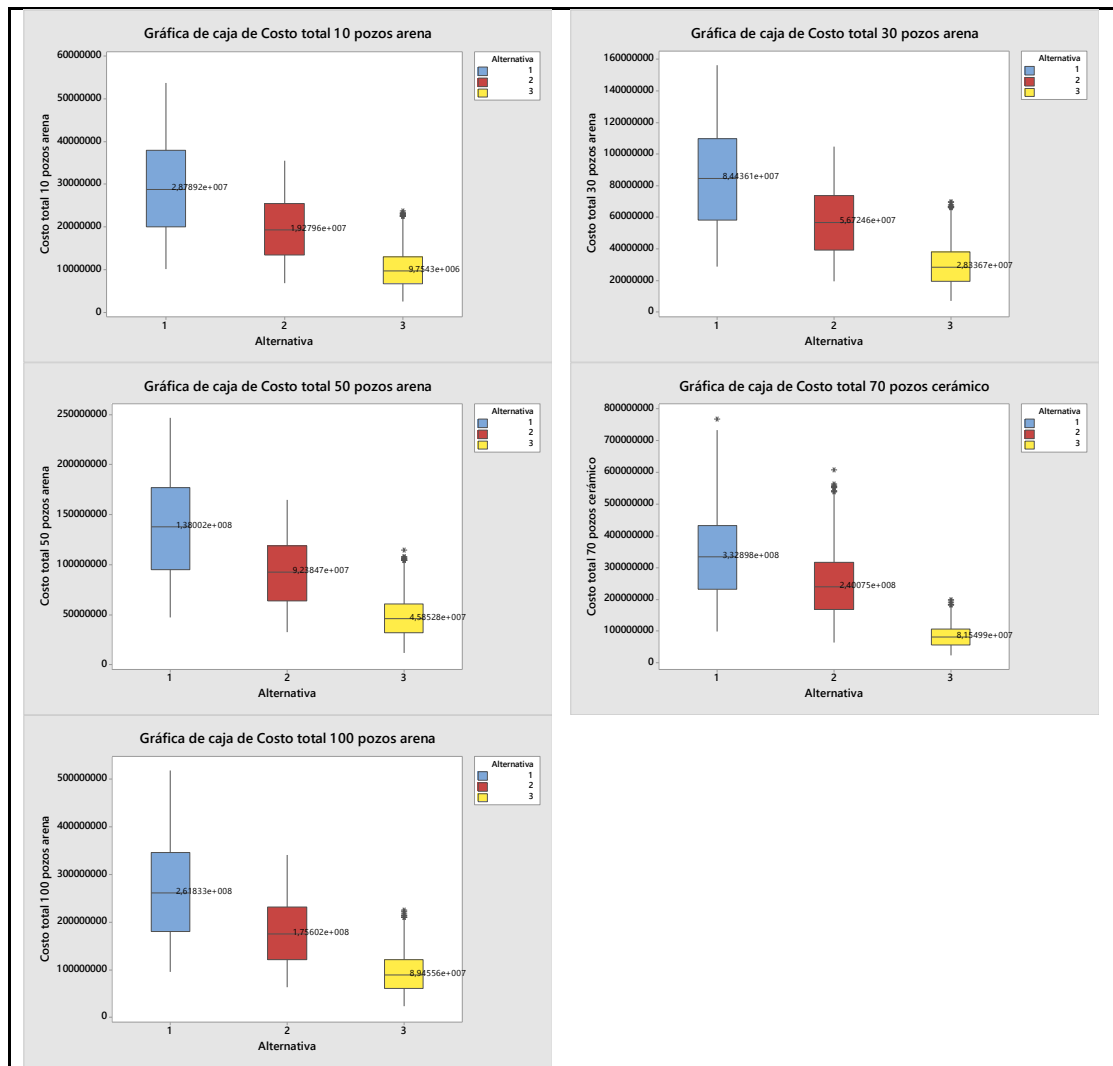


Fuente: elaboración propia con resultados del software Minitab.

Los resultados presentados en la **figura 10** indican que la mediana de costo total es más alta para la alternativa de adquirir el propante tipo cerámico a través de CST, mientras que la más baja es para la alternativa de importarlo directamente por la empresa operadora desde China, dicho comportamiento se mantiene similar a medida que se aumenta el número de pozos a producir. También se muestra que la mayor variabilidad la exhibe la alternativa 1, con un rango intercuartil superior al de las demás alternativas estudiadas. Además se aprecia que el costo total de la alternativa 3 es el menor de todos. Y se notan algunos valores atípicos en las alternativas 2 y 3, que corresponden a costos totales muy altos.

En la **figura 11** se observa que la alternativa 1 para la adquisición de los propantes tipo arena para diferentes niveles de producción presenta la mayor variabilidad de los datos con un rango intercuartil superior a las demás alternativas planteadas, así como la mediana de costo total más alta. El menor costo y la dispersión más baja lo exhibe la alternativa de importar directamente desde China. También se resalta que la alternativa 3 presenta valores atípicos en su extremo superior.

Figura 11. Gráficas de caja de Costo total para propante tipo arena



Fuente: elaboración propia con resultados del software Minitab.

En la **figura 12** se puede observar que la media es más alta para los apuntalantes tipo cerámico y tipo arena de la alternativa de suministro a través de una CST, mientras que los valores más bajos de este estadístico los presenta la alternativa de importación directa desde China; así mismo al analizar la desviación estándar

(figura 13) se encuentra que la dispersión de los datos presenta un comportamiento similar a la media con un aumento a medida que los niveles de producción crecen, esto último indica que en la alternativa 3 (importación directa) existe menos riesgo de obtener valores muy alejados del promedio. Además se advierte que la opción de comprar cerámicos es mejor para la alternativa de importación directa, dado que las diferencias en costo medio con la arena son más pequeñas respecto de las otras dos alternativas.

Figura 12. Media del costo total de la simulación

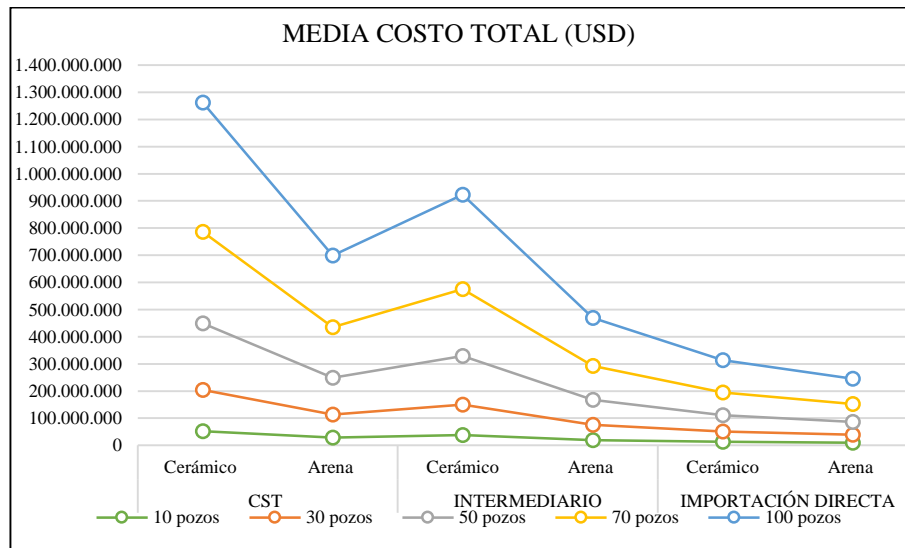
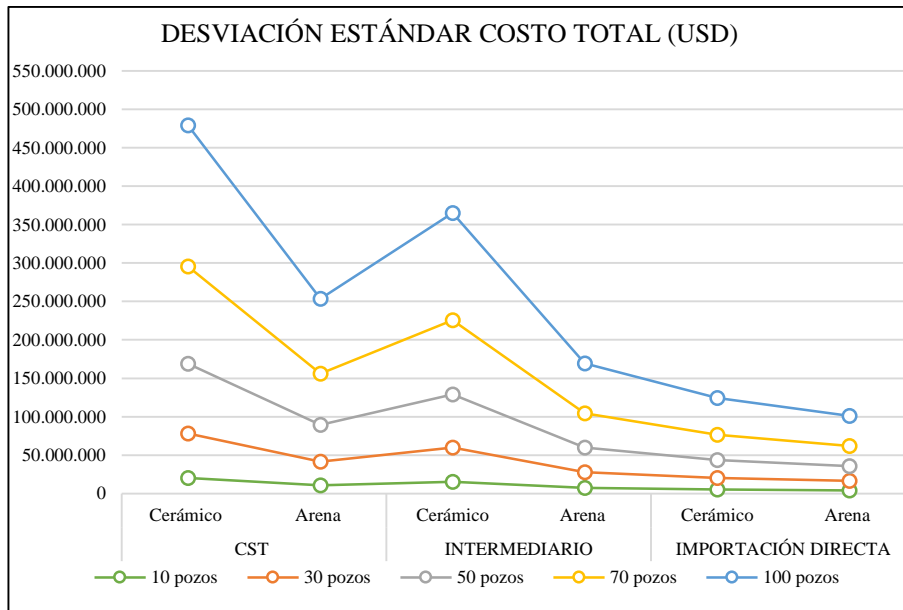
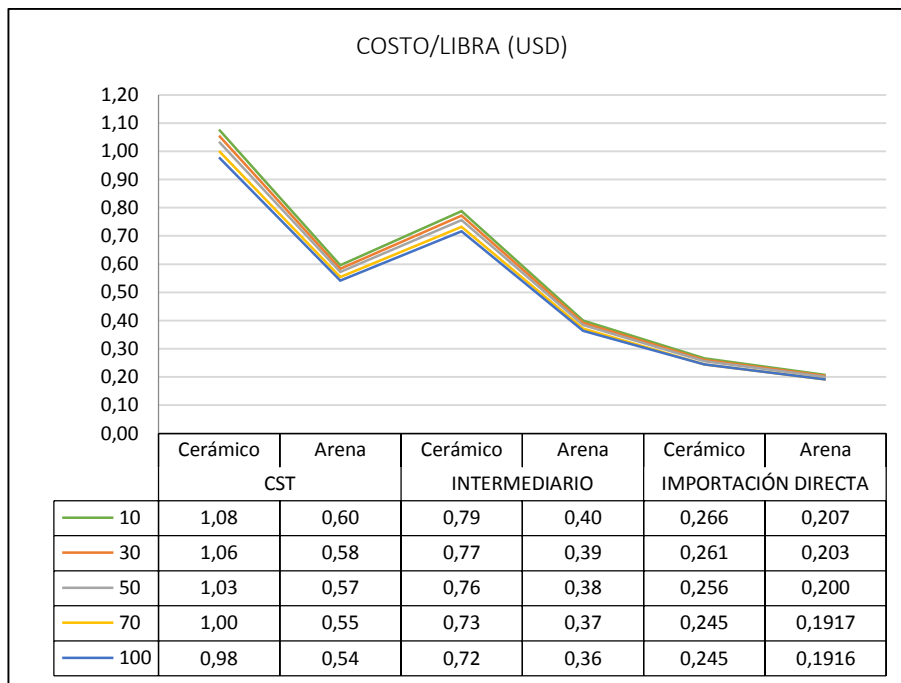


Figura 13. Desviación estándar del costo total de la simulación



En la **figura 14** se expone el cambio en el costo unitario del propante para las tres alternativas seleccionadas, para diferentes niveles de producción. En ésta se observa que el costo por libra de la alternativa de suministro a través de una CST es en promedio 1,37 veces y 1,49 veces el costo por libra de comprar propante tipo cerámico y arena con un intermediario respectivamente; asimismo al compararlo con el precio del propante por libra de la importación directa se aprecia que este equivale en promedio a 3 veces el costo del cerámico y a 1,87 veces el costo de la arena. Además, si se adquiere con un Intermediario saldría en promedio 1,96 y 0,92 veces más caro que comprarlo por medio de la importación directa. Finalmente la diferencia entre el costo unitario del cerámico y la arena es relativamente pequeña, lo que sugiere que al importar directamente sería mejor la opción de traer cerámicos, teniendo en cuenta las propiedades de fractura de estos.

Figura 14. Costo Unitario



Teniendo en cuenta que los posibles proveedores de estas materias primas no ofrecen información sobre descuentos por volúmenes, fue necesario hacer estimaciones para varios rangos de descuentos, en los cuales se obtuvo que la diferencia de costos para las tres alternativas sigue siendo consistente con los resultados presentados anteriormente.

### 6.3. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

En las **tablas 12, 13 y 14** se presentan los gráficos de tornado para las tres alternativas planteadas para propante cerámico y arena, para los diferentes niveles de producción (10; 30; 50; 70 y 100 pozos).

Tabla 12. Gráficos tornado para la alternativa 1 (CST)

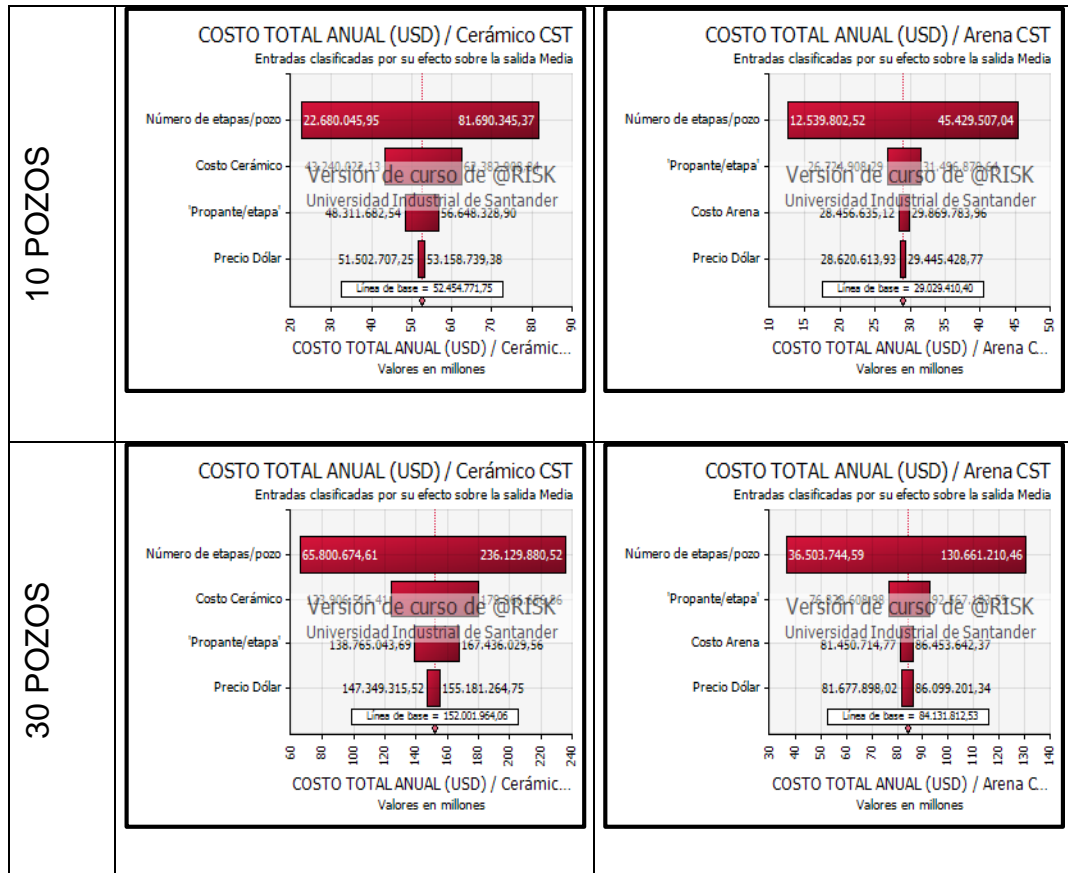
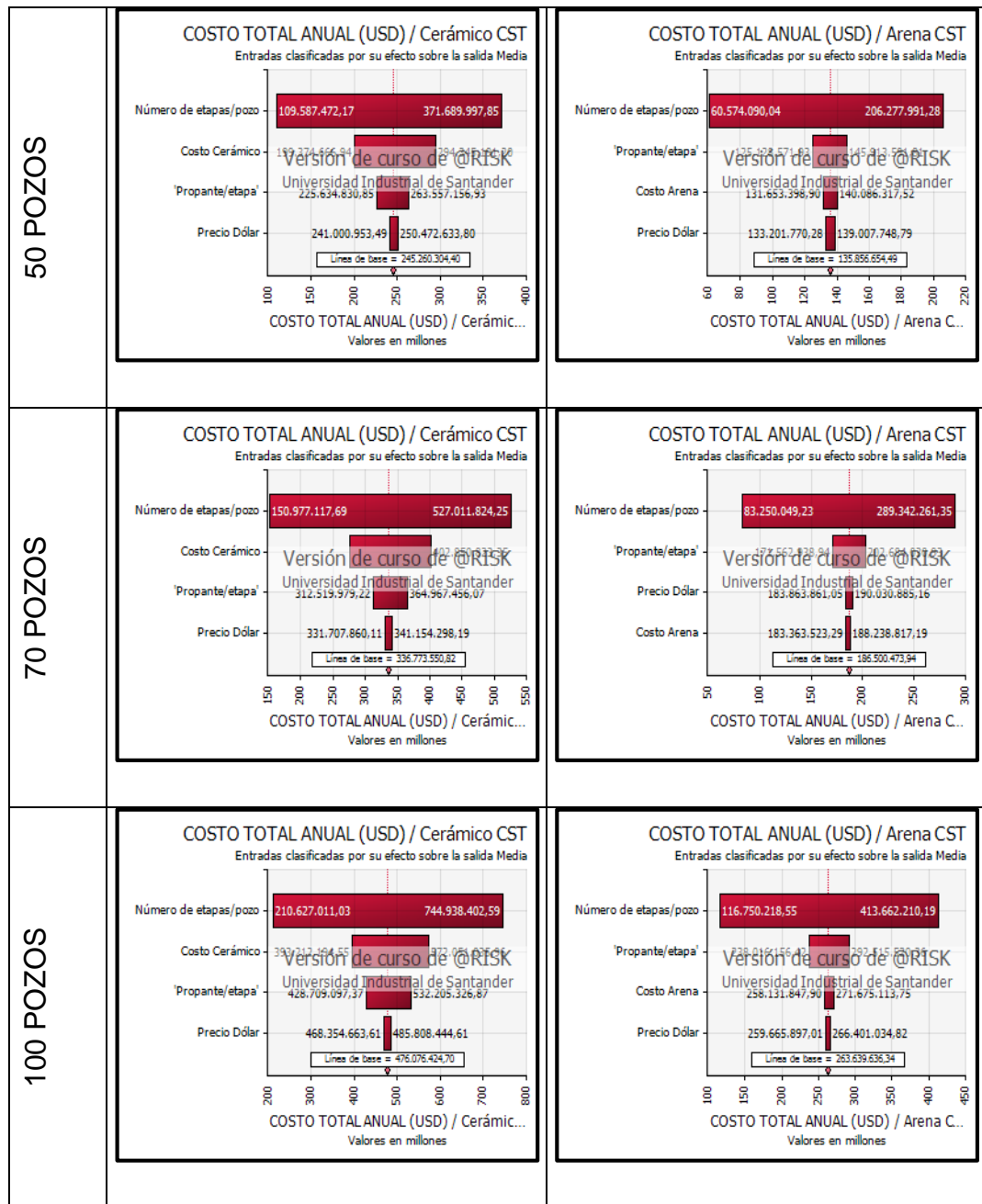


Tabla 12. (Continuación)



Fuente: elaboración propia con resultados del software @Risk.

Tabla 13. Gráficos tornado para la alternativa 2 (Intermediario)

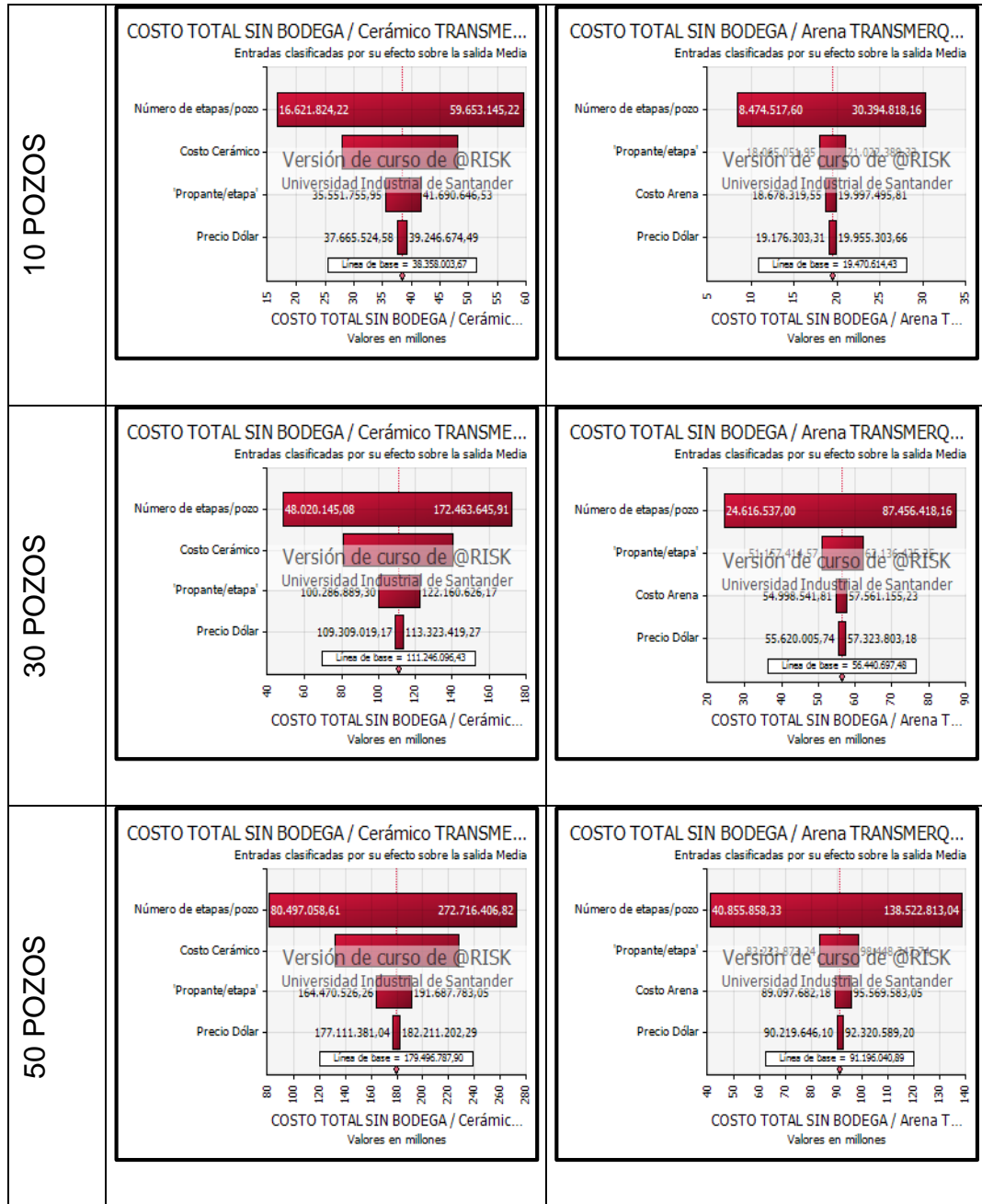
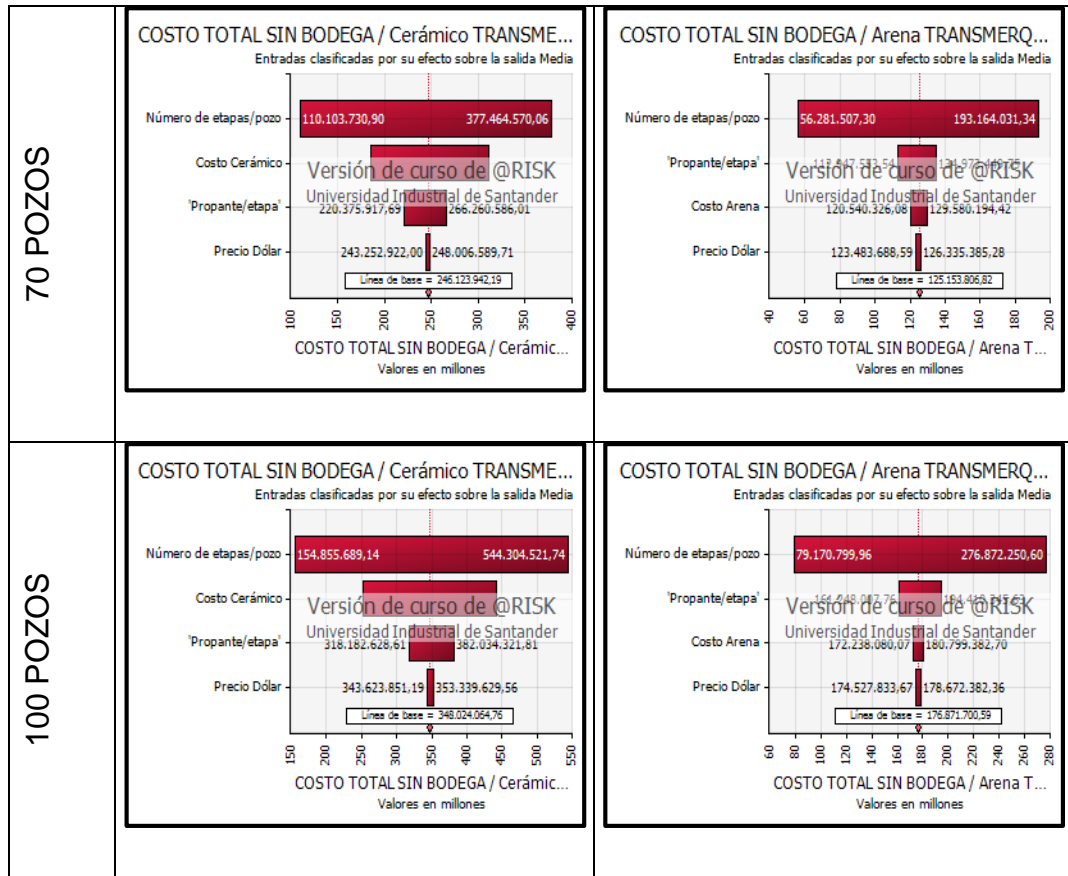


Tabla 13. (Continuación)



Fuente: elaboración propia con resultados del software @Risk.

Tabla 14. Gráficos tornado para la alternativa 3 (Importación directa)

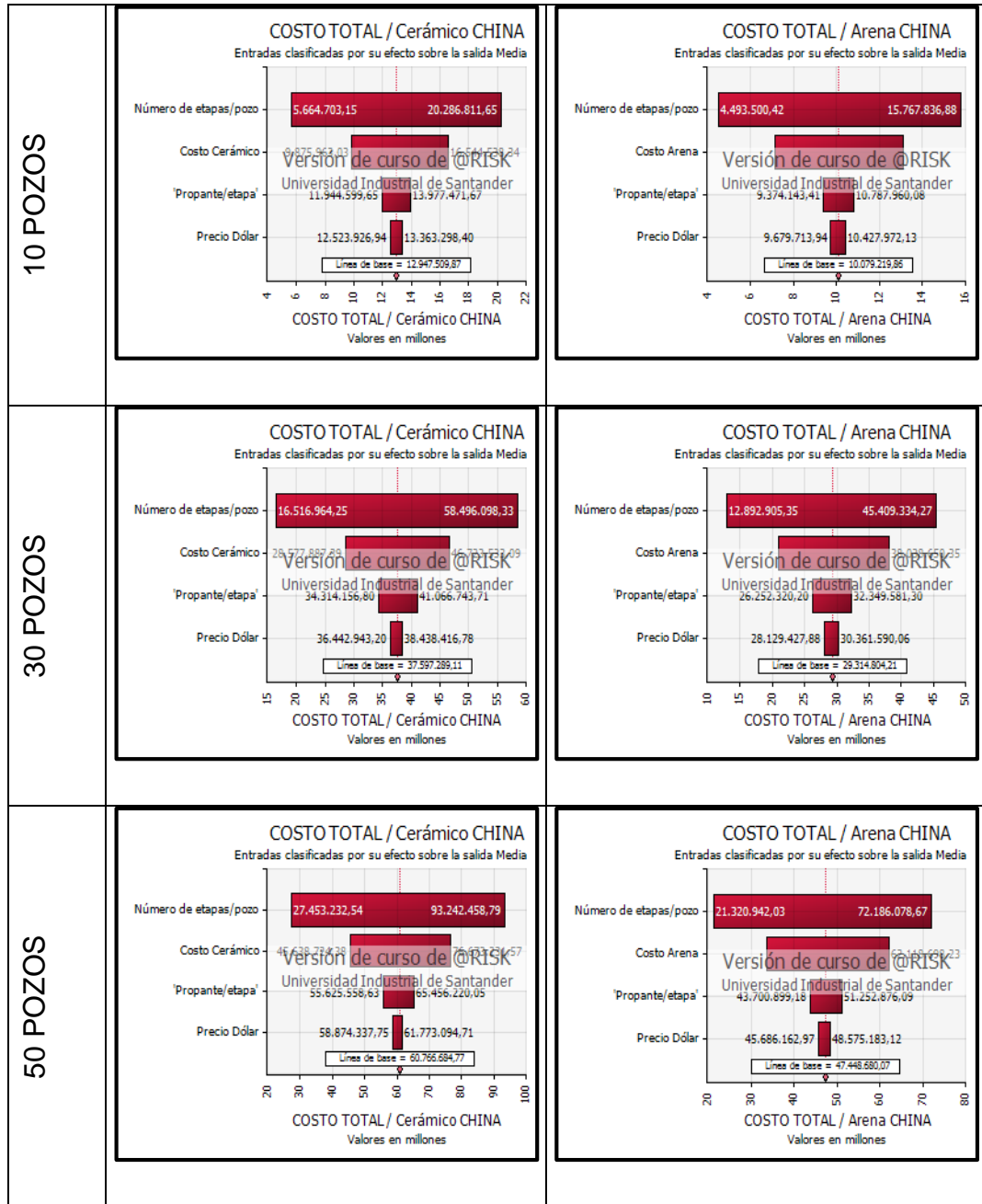
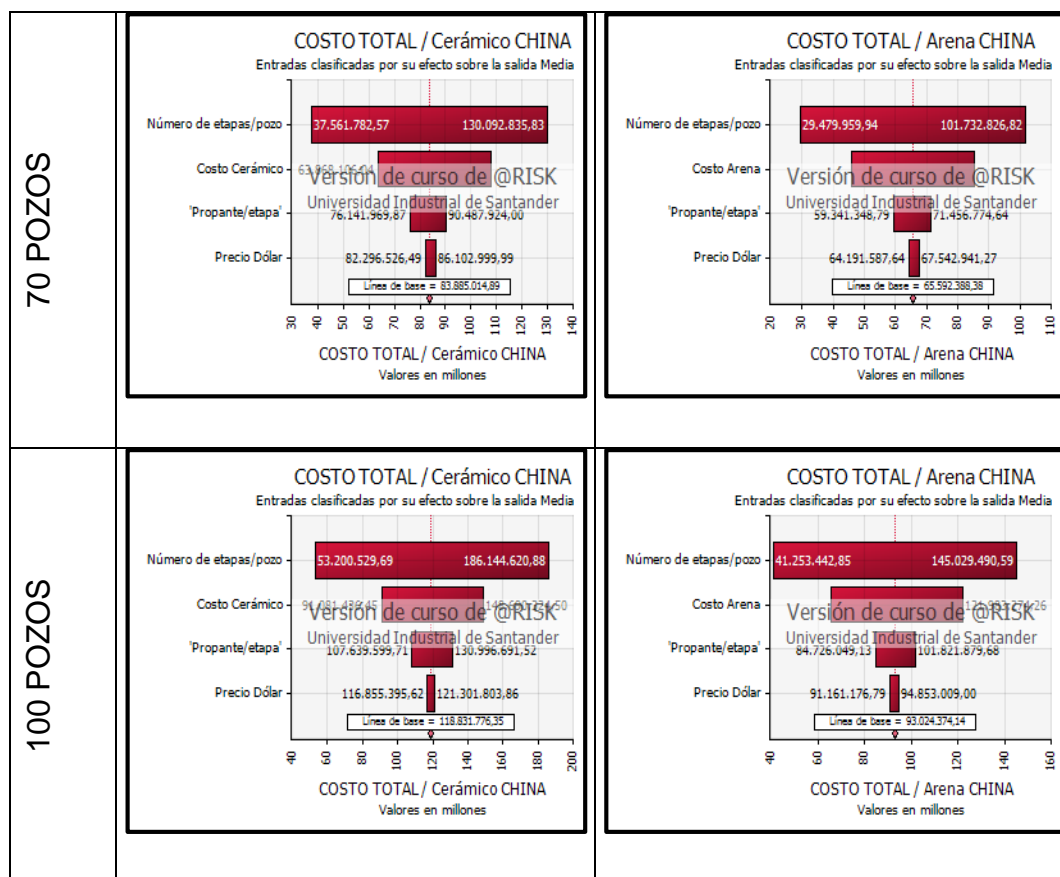


Tabla 14. (Continuación)



Fuente: elaboración propia con resultados del software @Risk.

Los gráficos de tornado indican cuales son las variables de entrada que tienen mayor relevancia sobre las distribuciones de probabilidad de salida del modelo. En este caso se observa que la variable a la que es más sensible el costo total es el número de etapas por pozo. Sin embargo, la segunda variable de mayor influencia difiere dependiendo del tipo de propante, para cerámico es el costo por libra de material y para arena es el número de libras de propante por etapa (alternativa 1 y 2) y el costo por libra (alternativa 3). Además se evidencia que el costo total presenta menos sensibilidad a las variaciones en la tasa de cambio peso-dólar. Además cabe

resaltar que todas las variables de entrada guardan una relación directa positiva con la variable respuesta.

## 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El suministro de agentes de sostén juegan un papel esencial en el desarrollo de las operaciones de fracturamiento hidráulico, ya que gracias a estos se mantiene abierto el conducto que permite la afluencia del fluido desde el yacimiento hasta la superficie.
- Tomando como referencia el proceso actual de suministro de propantes ejecutado por Ecopetrol, se hizo necesario plantear escenarios alternativos y evaluarlos a través de simulación por Monte Carlo con el fin de identificar las variables de mayor influencia y su impacto en el costo total, y de esta manera estar en la capacidad de tomar una decisión acerca de la opción que desde el criterio de menor costo se adapte a las necesidades de suministro de agentes de sostén de Ecopetrol.
- De los resultados de la presente investigación se podría inferir que bajo las condiciones y supuestos dados, la mejor alternativa para el suministro de propantes a un yacimiento no convencional en las inmediaciones del Valle del Magdalena Medio, es la alternativa de *importación directa* por parte de la empresa explotadora de hidrocarburos, ya que su costo es 1,96 y 0.92 veces menos para apuntalante cerámico y arena respectivamente que para la alternativa de comprarlo con un Intermediario. Mientras que al comparar esta alternativa con la CST su costo es 3,04 y 1,87 veces menor para propante cerámico y arena respectivamente.

- Al analizar tanto los costos totales como unitarios de los propantes tipo cerámico y tipo arena para la alternativa de *importación directa* se observa que la diferencia entre ellos es relativamente baja, por tal motivo se recomendaría inclinarse por la adquisición de propante tipo cerámico teniendo en cuenta sus mejores propiedades de fractura sobre la arena.
- La evaluación de la simulación permitió identificar que la variable de entrada *número de etapas por pozo* es la que mayor impacto tiene sobre el cambio en la media de la variable Costo total para las tres alternativas planteadas.
- Teniendo en cuenta los resultados, Ecopetrol en el caso de abastecer la materia prima a través de la empresa intermediadora debería negociar que la ubicación de la bodega de almacenamiento desde la cual se surta quedara en las inmediaciones de Barrancabermeja teniendo en cuenta los volúmenes de pedido. Esto con el fin de no incurrir en costos asociados al almacenamiento.
- En la alternativa 3 (importación directa) solo se tuvo en cuenta como proveedor del propante a un fabricante en China debido a la escasa disponibilidad de datos proporcionados por proveedores en otros países.
- Los resultados de este trabajo de investigación deben ser tenidos en cuenta siempre y cuando se cumplan los supuestos bajo los cuales se estimaron los costos totales, entre ellos los tipos de distribución, medias y varianzas de las diferentes variables estocásticas (precio unitario del propante, número de etapas por pozo, propante por etapa, etc.) además de los parámetros determinísticos (Costo de

transporte, bombeo, almacenamiento, administración, etc.). En el evento en que estos supuestos se modifiquen, el modelo presentado en el presente trabajo permite reestimar los costos de suministro de propante.

- Se recomienda completar la simulación teniendo en cuenta otros porcentajes de descuento por volumen de compra, considerando otras fuentes de abastecimiento e incluyendo la variable eficiencia de acuerdo al método de fracturamiento y el tipo de propante.

## BIBLIOGRAFIA

ANU, Maria. Introduction to modeling and simulation. En: Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference (7-10, diciembre: Atlanta, Georgia, U.S.A.). Memorias. 1997. p. 7-13.

ARVELO LUJAN, Ángel F. Pruebas de ajuste a la normal. EN: La capacidad de los procesos industriales. Métodos estadísticos exigidos por las normas ISO 9000. Caracas: Universidad Católica Andrés Bello, 1998. p. 26-58.

BAILEY, William, et al. Riesgos medidos. En: Oilfield Review. Invierno, 2001. p. 22-37.

CABALLERO MUÑOZ, Steven y CARRILLO MESA, Beatriz H. Selección del material propante en procesos de fracturamiento hidráulico en un pozo petrolero. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, 2012. 204 p.

CASTILLO NÚÑEZ, Rubén D. y LEAL HERNÁNDEZ, Alirio. Estudio básico de mercado para el suministro de propantes a nivel local, para yacimientos shale gas. Piedecuesta: Instituto Colombiano del Petróleo-Ecopetrol; 2011. 32 p. Informe Técnico.

CASTILLO NÚÑEZ, Rubén D. y LEAL HERNÁNDEZ, Alirio. Propantes en shale plays: evaluación y selección de los tipos de propantes a utilizar en el piloto de shale gas. Bucaramanga, Colombia. 2011.

Claves sobre la arena, insumo central del mundo shale. [En línea]. Observatorio petrolero sur. [Citado 20 de marzo de 2015]. Disponible en internet<<http://www.opsur.org.ar/blog/2013/11/17/claves-sobre-la-arena-insumo-central-del-mundo-shale/>>

CODESEIRA, Luciano P. Análisis Espacial del Desarrollo del Shale Gas de Vaca Muerta. Tesis de Maestría Interdisciplinaria en Energía. Buenos Aires: Universidad de Buenos Aires, 2013. 98 p.

COSS BU, Raúl. Introducción. En: Simulación. Un enfoque práctico. México D.F.: Limusa S.A., 2003. p. 11-18.

CURIEL, Mariela J. Simulación. [Diapositivas]. 2006. 16 diapositivas, blanco y negro.

GUASCH Antoni, et al. Modelado y simulación. Aplicación a procesos logísticos de fabricación y servicios. 2 ed. Barcelona: Edicions UPC, 2003. 351 p.

Halliburton inaugura la primera planta de almacenamiento y distribución en la Argentina. [En línea]. Argentina: Revista Petroquímica. [Citado 10 de octubre de 2014]. Disponible en internet<<http://revistapetroquimica.com/halliburton-inaugura-la-primera-planta-de-almacenamiento-y-distribucion-en-la-Argentina/>>

HERNÁNDEZ BARROS, Rafael. Metodología financiera de gestión y cuantificación de riesgos de las entidades aseguradoras. En: Pecunia Monográfico. 2011. p. 81-107.

HERNÁNDEZ SAMPIERI, Roberto; FERNÁNDEZ COLLADO, Carlos y BAPTISTA LUCIO, María del Pilar. Análisis paramétricos. EN: Metodología de la investigación. 6 ed. México D.F.: McGraw-Hill, 2014. p. 304-315.

INSTITUTO DE ENERGÍA. Requerimientos para el desarrollo del Reservoirio de Vaca Muerta (Neuquén/Argentina). Buenos Aires: Academia Nacional de Ingeniería; 2014. 44 p. Documento número 5.

JIMÉNEZ BOULANGER, Francisco; ESPINOZA GUTIÉRREZ, Carlos L. y FONSECA RETANA, Leonel. La estandarización. EN: Ingeniería económica. Costa Rica: Editorial Tecnológica de Costa Rica, 2007. p. 173.

MADRID, Marcelo. Agentes apuntalantes - Aspectos a considerar en el diseño de fracturamiento hidráulico. [En línea]. Portal del petróleo. [Citado 10 de marzo de 2015]. Disponible en internet <<http://www.portaldelpetroleo.com/2011/12/agentes-apuntalantes-aspectos.html>>

MARQUES DOS SANTOS, María José. Datos de Frecuencia. EN: Estadística Básica. Un enfoque no paramétrico. México D.F.: UNAM, 2001. p. 31-56.

MÁRQUEZ FERNÁNDEZ, Carlos A. [En línea]. Pruebas de bondad de ajuste. [Notas de clase]. [Citado 20 de septiembre de 2015]. Disponible en internet <<https://carlosmarquez.files.wordpress.com/2012/02/prueba-de-bondad-de-ajuste.pdf>>

MAWET, Pierre J., FLEMING, Alex C. y NICHOLS, John H. Eight leading practices for the proppant supply Chain. En: accenture. 2012. p. 1-20.

MONTGOMERY, Douglas C. y RUNGER, George C. Probabilidad y Estadística aplicadas a la Ingeniería. McGraw-Hill, año. p. 103

MORA GUTIERREZ, Luis A. Mantenimiento estratégico para empresas de servicios y/o industriales. AMG. Colombia. 2008.

NANGIA, Samir. Proppant market analysis. Houston: PacWest Consulting Partners, 2013. Informe técnico, no. 2.

PAC WEST: PARTNERS CONSULTING. North America Frac Sand Outlook. EN: SME Wisconsin Annual Conference. (Octubre, 2014: Eau Claire, WI USA). 2014. 40 p.

PALISADE CORPORATION. Guía para el uso de @Risk. Programa de complemento para el análisis y simulación de riesgos en Microsoft Excel. New York: Palisade Corporation; 2013. Versión 6.

PEÑARANDA, Victoria F. Arenas más allá del acatamiento a las normas. EN: Petrotecnia. Junio, 2014. p. 66-81.

PETROTECNIA. La elección de la arena es una de las decisiones más importantes en la etapa exploratoria. EN: Petrotecnia. Agosto, 2012. p. 70-72.

Segunda edición SHALE COLOMBIA: Congreso para el desarrollo de los no convencionales. [En línea]. Octubre de 2014 [Citado 6 de noviembre de 2014]. Disponible en internet <<http://www.espanol-shale-colombia-2014.com/>>

SERRANO GALLEGO, Roque. Introducción al análisis de datos experimentales. Tratamiento de datos en bioensayos. Castellón de la Plana: Universitat Jaume I, 2003. 32 p. (Colección ciencias experimentales; no. 4). ISBN 84-8021-429-5.

SERRANO SERRANO, Daniela. Factibilidad técnica y económica del uso de propantes ultralivianos en el fracturamiento hidráulico de pozos: aplicación en un campo colombiano. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. 2011. 109 p.

Simulación de eventos discretos como técnica fundamental en la toma de decisiones de alto impacto. [En línea]. VaticGroup. [Citado 30 de enero de 2015]. Disponible en internet<<http://www.vaticgroup.com/perspectiva-logistica/ediciones-antteriores/simulacion-de-eventos-discretos/>>

Soluciones de cerámica orientadas a la tecnología para la industria de hidrocarburos. [En línea]. Saint-Gobain NorPro. [Citado 15 de abril de 2015]. Disponible en internet<<http://www.norpro.saint-gobain.com/uploadedFiles/SGnorpro/Documents/NorproBro-Spanish.pdf>>

South American Silica Corp. aplica para obtener una concesión en Uruguay luego de haber recibido resultados positivos en las pruebas realizadas a las arenas a ser utilizadas dentro del proceso de fracturación hidráulica. [En línea]. Toronto

(Cánada): U308CORP, 2014-[Citado 14 de septiembre de 2015]. Disponible en internet <[http://u3o8corp.com/docs/Press\\_Releases/2014/Spanish/South%20American%20Silica%20CorpSpanish\\_GB.pdf](http://u3o8corp.com/docs/Press_Releases/2014/Spanish/South%20American%20Silica%20CorpSpanish_GB.pdf)>.

SOVACOOOL, Benjamin K. Cornucopia of curse? Reviewing the costs and benefits of shale gas hydraulic fracturing (fracking). En: Renewable and Sustainable Energy Reviews. Septiembre, 2014. vol. 37, p. 249-264.

TONCEL HERNÁNDEZ, Enrique A. Factibilidad técnica y financiera para la fabricación de material propante, base arena natural, utilizado en el fracturamiento hidráulico en Colombia. Trabajo de grado ingeniero de petróleos. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. 2013. 132 p.

TYMKO, Dean W. Shale Gas Well Completion Logistics. En: SPE Annual Technical Conference (19-22, Septiembre, 2010: Florencia, Italia). SPE International, 2010. 8 p.

VÁRELA VILLEGAS, Rodrigo. Evaluación económica y comparación de alternativas que producen el mismo servicio. En: Evaluación económica de proyectos de inversión. 7 ed. Bogotá: McGraw-Hill, 2010. p. 114-139.

Visiongain. Proppants market 2013-2023. Visiongain, 2013. Informe técnico.

What is a proppant? [En línea]. Coast 2 Coast Ceramics LLC. [Citado 10 de marzo de 2015]. Disponible en internet <<http://www.coast2coastceramics.com/what-is-a-proppant.php>>